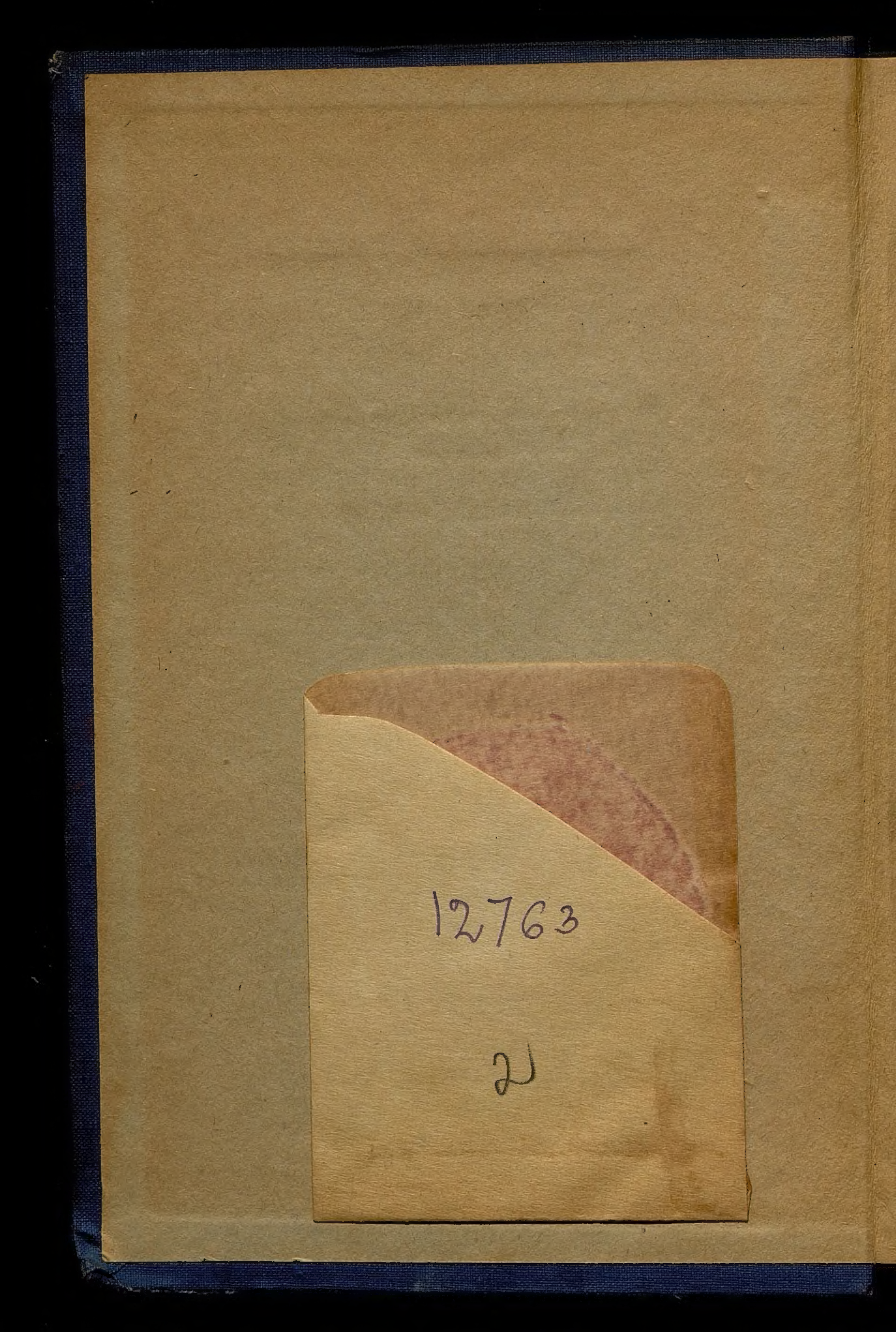
С. Н. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ

СПРАВОЧНИК ПО ТЕОРИИ КОРАБЛЯ

СУДПРОМГИЗ
1950

СПРАВОЧНИК ПО ТЕОРИИ КОРАБЛЯ
СУДПРОМГИЗ



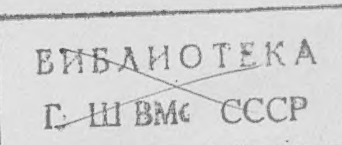
12763
2)

Доц. С. Н. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ

СПРАВОЧНИК ПО ТЕОРИИ КОРАБЛЯ

СТАТИКА КОРАБЛЯ
КАЧКА КОРАБЛЯ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1950

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр

Стр.

ОТ АВТОРА

Справочная книга по теории корабля предназначается служить практическим пособием для инженеров и техников кораблестроителей, а также для студентов и аспирантов кораблестроительных втузов при выполнении ими расчетов по теории корабля. Настоящая книга является первой частью справочника и содержит два раздела — „статика корабля“ и „качка корабля“.

Изложение книги рассчитано на читателя, знакомого с основами теории корабля и не может служить для первоначального ознакомления с этой наукой. Соответственно назначению книги текстовой материал ее сжат и сообщаемые расчетные методы, вычислительные схемы и расчетные формулы приводятся в виде окончательных результатов без подробных математических выводов. Тем не менее всюду, где это возможно, в тексте сообщаются принципиальные положения, принятые в основу рекомендуемых методов или отдельных формул, с целью облегчить читателю их сознательное применение. В тексте приводятся также краткие пояснения физического смысла сообщаемых методов расчета, вычислительных схем и расчетных формул и указываются пределы их применения, что поможет пользующемуся книгой критически оценить степень достоверности получаемых с ее помощью результатов. Особенно это относится ко всякого рода условным методам расчета, применение которых при современном уровне развития теории корабля во многих случаях оказывается необходимым.

Автор начал работу над справочником по теории корабля в 1936 году. Оба раздела справочника были подготовлены к печати под общей редакцией академика В. Л. Поздюнина, но изданию книги помешали военные события.

Приступая к работе над справочником, автор намеревался в первую очередь собрать результаты работ русских и, главным образом, советских ученых-кораблестроителей и затем дополнить их иностранными материалами. Лишь такие вопросы, которые были недостаточно освещены в отечественной литературе, предполагалось изложить по данным иностранных источников. В результате, после окончательной компоновки рукописи выяснилось, что основное содержание ее составляют результаты работ советских ученых А. Н. Крылова, Ю. А. Шиманского, Г. Е. Павленко, В. Л. Поздюнина, В. Г. Власова, В. В. Семенова Тян-Шанского и др., дающие

исчерпывающее решение рассматриваемых вопросов, и что доля заключающихся в ней иностранных материалов очень невелика.

Вторично автор начал работать над рукописью в 1948 г. За истекший период советская наука обогатилась рядом новых исследований, материалы которых необходимо было включить в книгу. Были опубликованы результаты новых исследований В. Г. Власова, Г. Е. Павленко, Г. А. Фирсова, А. В. Герасимова, В. В. Семенова Тян-Шанского и др. по многочисленным вопросам теории статики и качки корабля, которые получили свое отражение в книге. Частично автор дополнил содержание книги и материалами собственных исследований по некоторым вопросам теории динамической остойчивости и качки корабля. Вновь была написана VI глава по статике корабля, содержащая рекомендации по методам определения кренящих судно сил и проверки его остойчивости, а также указания о способах составления информации об остойчивости и о методах расчета по статике судоподъема. Рукопись была дополнена также вспомогательными вычислительными таблицами, применение которых существенно облегчает и ускоряет выполнение многих расчетов по статике корабля.

В работе над рукописью как в первом варианте, так и в настоящем принимал участие В. В. Семенов Тян-Шанский, полностью написавший главу „Спуск на воду".

Автор

РАЗДЕЛ 1

СТАТИКА КОРАБЛЯ

ГЛАВА I

ПЛОВУЧЕСТЬ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА

§ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЧЕРТЕЖ. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ

Геометрическая форма наружной поверхности судового корпуса изображается с помощью теоретического чертежа (рис. 1). Для всех судов, кроме деревянных, принято изображать на теоретическом чертеже поверхность корабля без наружной обшивки.

За плоскости проекций теоретического чертежа принимаются следующие:

1. Плоскость диаметральная, или вертикально-продольная, проходящая вдоль всего судна посредине его ширины и являющаяся плоскостью его симметрии. Проекция судна на эту плоскость — бок.

2. Плоскость грузовой, или конструктивной, ватерлинии, совпадающая с поверхностью спокойной воды при плавании судна по проектную осадку. Проекция судна на эту плоскость — полуширота.

3. Плоскость мидель-шпангоута, перпендикулярная первым двум и проходящая посредине расчетной длины судна. Проекция судна на этой плоскости — корпус.

Сечения судна плоскостями, параллельными плоскостям проекций, образуют три системы главных сечений, а именно: шпангоуты, ватерлинии и батоксы.

Шпангоутами называются кривые, происходящие от пересечения поверхности корпуса плоскостями, параллельными плоскости миделя. Шпангоут, совпадающий с плоскостью миделя, называется мидель-шпангоутом, или миделем, и обозначается на чертежах условным знаком ⊠. Миделем называют также шпангоут, проходящий в самой широкой части судна. Однако в статике корабля термин мидель применяется к сечению, расположенному в середине расчетной длины, за исключением особо оговариваемых случаев.

Ватерлиниями называются кривые, образуемые пересечением поверхности судна плоскостями, параллельными плоскости грузовой, или конструктивной, ватерлинии.

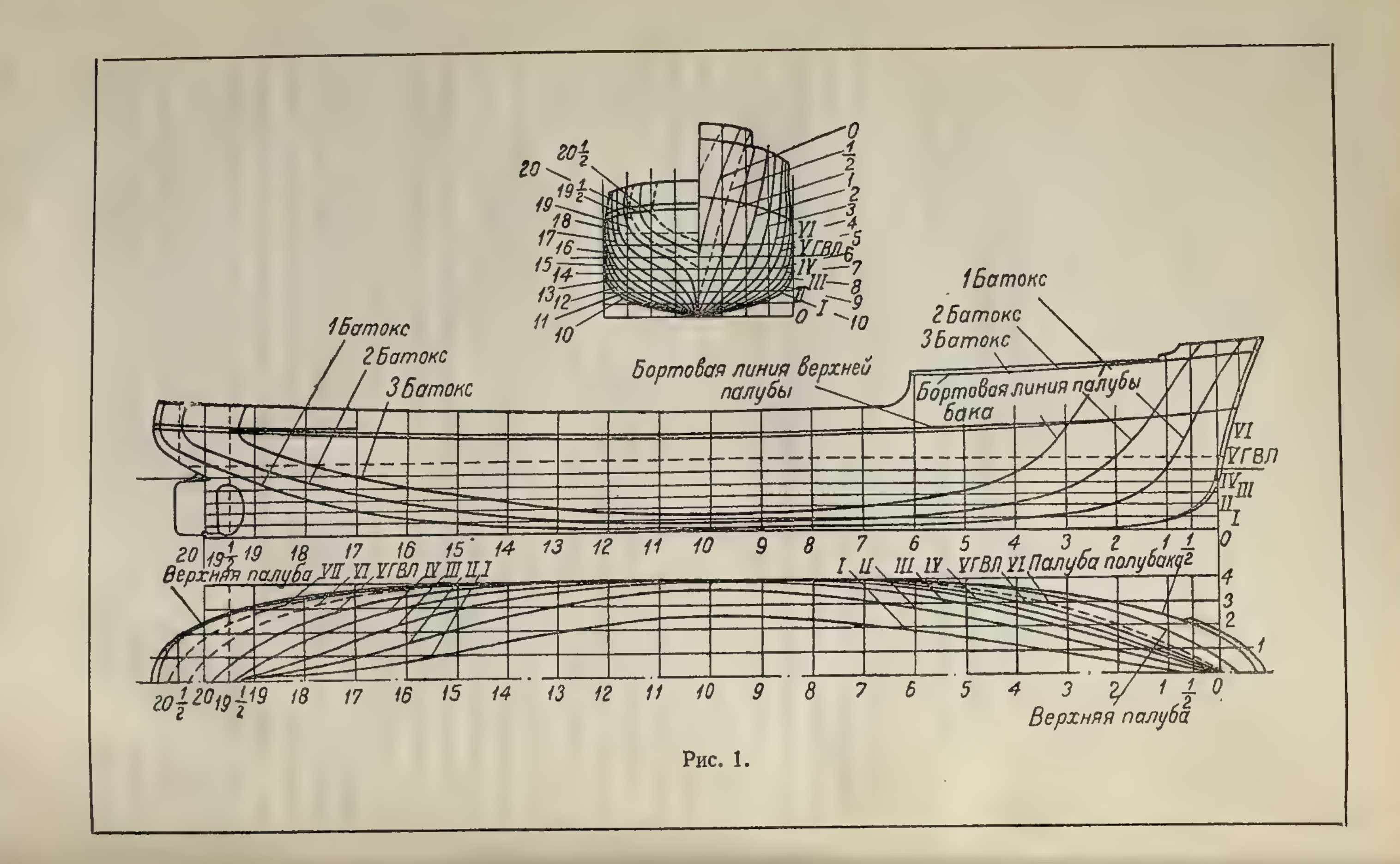

1 Батокс
2 Батокс
3 Батокс
Бортовая линия верхней палубы
Бортовая линия палубы бака
Верхняя палуба
Палуба полубака
VI
V ГВЛ
IV
III
II
I
VII

Рис. 1.

Батоксами называются кривые, получающиеся от пересечения поверхности судна плоскостями, параллельными диаметральной плоскости.

Плоскость, проходящая через точку пересечения мидель-шпангоута с верхней кромкой горизонтального или брускового киля и параллельная грузовой ватерлинии, называется **основной плоскостью**, от которой измеряются все вертикальные расстояния. Термином „основная плоскость“ называют также плоскость, проходящую через средний прямолинейный участок линии киля. Для большинства судов грузовая ватерлиния принимается параллельной линии киля, и тогда обозначения совпадают. Линия пересечения основной плоскости с диаметральной называется **основной линией**.

Главными геометрическими размерениями судна являются его **длина, ширина, высота борта** и **углубление**, или **осадка**.

В дальнейшем приняты следующие обозначения:

L — длина судна; различают три длины судна:

L_p — длина между перпендикулярами, проходящими через точки пересечения грузовой ватерлинии у военных судов с линиями штевней, а у гражданских судов — с передней кромкой форштевня и с осью руля;

L_w — длина по грузовой; измеряется между точками пересечения грузовой ватерлинии с крайними обводами носа и кормы; у военных судов она равна длине между перпендикулярами;

L_{max} — наибольшая длина между перпендикулярами, опущенными из крайних точек обводов носа и кормы;

B — наибольшая ширина грузовой;

B_{max} — наибольшая ширина судна;

H — высота борта, измеряемая в миделевом сечении от основной линии до линии палубы у борта;

$T_н$ — теоретическое углубление носом, измеряемое при носовом перпендикуляре от уровня воды до проходящей через средний прямолинейный участок киля основной линии;

$T_к$ — углубление кормой, измеряемое при кормовом перпендикуляре;

$T_{ор}$ — среднее углубление судна, измеряемое в сечении, проходящем через центр тяжести площади ватерлинии;

$T_{⊠}$ — среднее углубление, измеряемое у мидель-шпангоута [1]);

V — объемное водоизмещение корабля, равное объему его подводной части;

D — вес судна, или его весовое водоизмещение;

S — площадь ватерлинии;

ω — площадь шпангоута;

γ — вес единицы объема воды.

---

[1]) Теоретическое углубление не следует смешивать с действительной осадкой, которая измеряется не от основной линии, а от нижней кромки киля. Наносимые на корпусе судна марки углубления соответствуют обычно действительной осадке.

В дальнейшем изложении точка o пересечения мидель-шпангоута и основной линии принята за начало координат, ось ox совпадает с основной линией и направлена в нос, ось oy — на правый борт, а ось oz — вертикально вверх (рис. 2).

Положение судна по отношению к поверхности спокойной воды называется его посадкой. Основными случаями посадки судна являются следующие:

1. Основная плоскость, проходящая через средний прямолинейный участок киля, — горизонтальна. Корабль, имеющий такую посадку, называется сидящим прямо и на ровный киль.

2. Основная линия, проходящая через средний прямолинейный участок киля, — горизонтальна, а диаметральная плоскость наклонена и составляет с вертикальной плоскостью угол θ, называемый углом крена. Корабль, имеющий такую посадку, называется сидящим на ровный киль, но с креном.

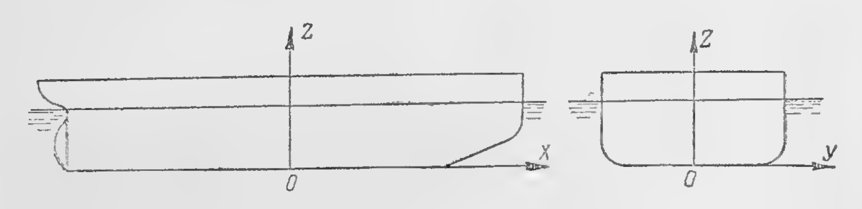


Рис. 2.

3. Диаметральная плоскость вертикальна, а основная линия, проходящая через средний прямолинейный участок киля, наклонена и составляет с горизонтальной поверхностью воды некоторый угол ψ, называемый углом дифферента. Корабль, имеющий такую посадку, называется сидящим прямо, но с дифферентом.

4. Основная линия наклонена и диаметральная плоскость не вертикальна. Этот случай посадки является самым общим и при нем говорят, что корабль сидит с креном и дифферентом.

Коэффициенты полноты. Форма корабля в известной мере характеризуется следующими коэффициентами и соотношениями главных размерений.

Коэффициент полноты площади грузовой ватерлинии:

$$\alpha = \frac{S}{LB},$$

где S — площадь грузовой.

Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута, проходящего через наиболее широкое сечение судна,

$$\beta = \frac{\omega_{\otimes}}{BT},$$

где $\omega_{\otimes}$ — площадь мидель-шпангоута.

Коэффициент полноты водоизмещения:

$$\delta = \frac{V}{LBT}.$$

Коэффициент вертикальной полноты:

$$\chi = \frac{V}{ST} = \frac{\delta}{\alpha}.$$

Коэффициент продольной полноты:

$$\varphi = \frac{V}{\omega_{\otimes} L} = \frac{\delta}{\beta}.$$

Основными соотношениями главных размерений являются:

$$\frac{L}{B};\ \frac{B}{T};\ \frac{L}{H};\ \frac{H}{T}.$$

§ 2. УСЛОВИЯ ПЛОВУЧЕСТИ СУДНА И КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

Пловучестью называется способность судна плавать на воде или под водой, в определенном положении относительно горизонта воды, неся на себе определенное количество грузов.

На плавающее на спокойной воде судно действуют два рода сил: силы веса и силы гидростатического давления воды на погруженную часть судна.

Для равновесия плавающего судна необходимо, чтобы равнодействующие сил веса и сил давления воды были равны по величине, противоположно направлены и чтобы точки приложения равнодействующих лежали на одной вертикали. Равнодействующая сил гидростатического давления воды называется *силой поддержания*, или *силой пловучести*. Согласно закону Архимеда, сила пловучести равна весу воды в объеме, вытесняемом подводной частью судна, и направлена вертикально вверх, а точка приложения ее лежит в геометрическом центре тяжести подводного объема и называется центром величины.

Уравнения равновесия судна, плавающего без крена и дифферента, имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} D &= \gamma V \\ x_g &= x_c \\ y_g &= y_c = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где D — вес судна, m;

γ — вес 1 $м^3$ воды;

V — объем подводной части судна, или его объемное водоизмещение, $м^3$.

При наличии у судна крена и дифферента уравнения равновесия принимают более сложный вид и приводятся в § 15 [ф-лы (36)].

Количество грузов, которое корабль может принять сверх находящихся на нем до полного погружения, называется запасом пловучести. Мерой для запаса пловучести служит объем надводной непроницаемой части корабля. Для бронированных военных кораблей сверх обычного запаса пловучести рассматривается боевой запас пловучести, величина которого определяется объемом бронированной надводной части корабля.

Практикой установлены следующие основные виды водоизмещения военных кораблей.

1. Водоизмещение порожнем — водоизмещение совершенно готового корабля, снабженного механизмами, вооружением и всем другим оборудованием согласно утвержденной спецификации для военного времени, но без личного состава, боезапаса, снабжения, продовольствия и без запасов топлива, смазочных материалов, питательной, береговой и питьевой воды в систернах и теплых ящиках.

2. Стандартное водоизмещение — водоизмещение совершенно готового корабля, полностью укомплектованного личным составом, снабженного всеми механизмами и готового к выходу в море, включая все вооружение и боезапас, снаряжение, оборудование, продовольствие и пресную воду для личного состава, снабжение и все прочее, предусмотренное утвержденной спесификацией для военного времени, исключая запасы топлива, смазочных материалов и питательной воды, но с пресной и забортной водой и маслом в системах, механизмах, котлах, теплых ящиках и сточных масляных систернах, т. е. включая вес механической установки, готовой к действию.

3. Полное водоизмещение — водоизмещение, равное стандартному, плюс запасы топлива, смазочных материалов и питательной воды для котлов и механизмов в размерах, обеспечивающих заданную дальность плавания полным и экономическим ходом.

4. Водоизмещение при официальных испытаниях, или нормальное водоизмещение, — водоизмещение, равное стандартному, плюс запасы топлива, смазочных материалов и питательной воды в размере половины запасов, обусловленных полным водоизмещением корабля.

5. Наибольшее водоизмещение, — водоизмещение, равное стандартному, плюс добавочный боезапас, который корабль может принять в оборудование погреба или на минные пути сверх нормального запаса, предусмотренного стандартным водоизмещением, а также плюс запас топлива, смазочных материалов и питательной воды при условии полного заполнения помещений, предназначенных для этих грузов.

Для гражданских судов морского флота различают следующие основные виды водоизмещения.

1. Водоизмещение порожнем соответствует весу судна в готовом для выхода в море состоянии со всем судовым снабжением, но без груза, перевозка которого является назначением судна, а также без экипажа с багажом, топлива и всех расходных запасов.

2. Водоизмещение в полном грузу соответствует весу судна при наибольшей допустимой осадке, определяемой правилами классификационных обществ.

3. Водоизмещение с полным грузом, но без запасов топлива и масла, соответствующее нагрузке судна при возвращении из рейса, и др.

Полная грузоподъемность гражданского транспортного судна называется дедвейтом. В состав дедвейта, помимо грузов и пассажиров с багажом, для перевозки которых предназначено судно, входят следующие веса: а) экипажа судна с багажом; б) всей пресной и соленой воды, за исключением той, которая находится в главных механизмах, холодильниках, трубопроводах и котлах в рабочем их состоянии; в) судовых расходных запасов и г) полных запасов топлива.

Веса всех грузов и пассажиров с багажом, перевозка которых является назначением судна, составляют полезную, или чистую, грузоподъемность судна.

§ 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ ПО КВЛ

Обозначим ординаты поверхности судна (ординаты пересечений теоретических шпангоутов с теоретическими ватерлиниями, измеряемые от диаметральной плоскости на один борт) через y. Тогда величина V определится общим выражением:

$$V = 2\int_0^T \int_{L_к}^{L_н} y\,dx\,dz, \tag{2}$$

но $2\int_{L_к}^{L_н} y\,dx = S$ — площади ватерлинии, где $L_н$ — длина носовой части ватерлинии от форштевня до миделя; $L_к$ — длина кормовой части ватерлинии;

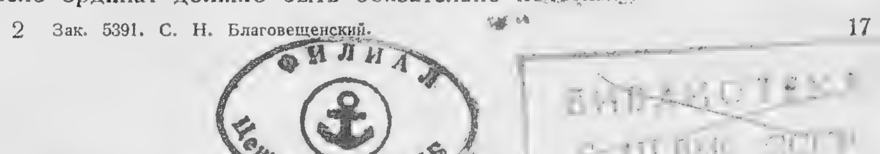
$$2\int_0^T y\,dz = \omega \text{ — площади шпангоута.}$$

Отсюда на основании выражения (2) можем написать:

$$V = \int_0^T S\,dz = \int_{L_к}^{L_н} \omega\,dx. \tag{3}$$

Входящие сюда определенные интегралы вычисляются обычно по правилам трапеций, Симпсона или Чебышева, причем предпочтительнее пользоваться правилами трапеций и Чебышева, обеспечивающими необходимую точность при более простых и удобных вычислительных схемах.

Для вычисления по правилу трапеций или Симпсона ординаты y должны быть расположены как на равных расстояниях по длине, так и на равных расстояниях по высоте, причем для правила Симпсона число ординат должно быть обязательно нечетным.



Вычисление по правилу трапеций

Площадь ватерлинии:

$$S_i = 2\frac{L}{n}\left[y_{0i} + y_{1i} + y_{2i} + \ldots + y_{ni} - \frac{1}{2}(y_{0i} + y_{ni})\right] = 2\frac{L}{n}\sigma_i. \quad (4)$$

Площадь шпангоута:

$$\omega_j = 2\frac{T}{m}\left[y_{j0} + y_{j1} + y_{j2} + \ldots + y_{jm} - \frac{1}{2}(y_{j0} + y_{jm})\right] = 2\frac{T}{m}u_j. \quad (5)$$

Водоизмещение:

$$V = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\left[\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2 + \ldots + \sigma_m - \frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_m)\right] = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0 \quad (6а)$$

или

$$V = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\left[u_0 + u_1 + u_2 + \ldots + u_n - \frac{1}{2}(u_0 + u_n)\right] = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0. \quad (6б)$$

Для нормальных морских судов число $(n+1)$ шпангоутов берут обычно не менее 21, а число $(m+1)$ ватерлиний не менее 8. Нумерация шпангоутов в формулах (4—6б) принята от носа к корме, а ватерлиний — от основной плоскости к КВЛ.

Схема расположения вычислений приведена в табл. 1.

Вычисление по первому правилу Симпсона

Площадь ватерлинии:

$$S_i = \frac{4}{3}\frac{L}{n}\left(\frac{1}{2}y_{0i} + 2y_{1i} + y_{2i} + 2y_{3i} + \ldots + 2y_{n-1i} + \frac{1}{2}y_{ni}\right) = \frac{4}{3}\frac{L}{n}\sigma'_i. \quad (7)$$

Площадь шпангоута:

$$\omega_j = \frac{4}{3}\frac{T}{m}\left(\frac{1}{2}y_{j0} + 2y_{j1} + y_{j2} + 2y_{j3} + \ldots + 2y_{jm-1} + \frac{1}{2}y_{jm}\right) = \frac{4}{3}\frac{T}{m}u'_j. \quad (8)$$

Водоизмещение:

$$V = \frac{2}{3}\frac{4}{3}\frac{L}{n}\frac{T}{m}\left(\frac{1}{2}\sigma'_0 + 2\sigma'_1 + \sigma'_2 + 2\sigma'_3 + \ldots + 2\sigma_{m-1} + \frac{1}{2}\sigma_m\right) = \frac{8}{9}\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0 \quad (9а)$$

или

$$V = \frac{2}{3}\frac{4}{3}\frac{L}{n}\frac{T}{m}\left(\frac{1}{2}u'_0 + 2u'_1 + u'_2 + 2u'_3 + u'_4 + \ldots + 2u'_{n-1} + \frac{1}{2}u'_n\right) = \frac{8}{9}\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0. \quad (9б)$$

Таблица 1

Вычисление V по правилу трапеций

Номера шпангоутов	Номера ватерлиний							
	0 (киль)	1	:	m (ГВЛ)	Суммы ординат шпангоутов	Поправки	Исправленные суммы (функции $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов)	Площади шпангоутов
0 у носового перпендикуляра	y_{00}	y_{01}	:	y_{0m}	$\sum y_{0j}$	$\frac{1}{2}(y_{00}+y_{0m})$	u_0	$\omega_0=\frac{2T}{m}u_0$
1	y_{10}	y_{11}	:	y_{1m}	$\sum y_{1j}$	$\frac{1}{2}(y_{10}+y_{1m})$	u_1	$\omega_1=\frac{2T}{m}u_1$
:	:	:	:	:	:	:	:	:
n у кормового перпендикуляра	y_{n0}	y_{n1}	:	y_{nm}	$\sum y_{nj}$	$\frac{1}{2}(y_{n0}+y_{nm})$	u_n	$\omega_n=\frac{2T}{m}u_n$
Суммы ординат ватерлиний	$\sum y_{i0}$	$\sum y_{i1}$	:	$\sum y_{im}$	×	×	$\sum u_j$	
Поправки	$\frac{1}{2}(y_{00}+y_{n0})$	$\frac{1}{2}(y_{01}+y_{n1})$	:	$\frac{1}{2}(y_{0m}+y_{nm})$	×	×	$\frac{1}{2}(u_0+u_n)$	
Исправленные суммы (функции $\frac{1}{2}$ площадей ватерлиний)	σ_0	σ_1	:	σ_m	$\sum \sigma_j$	$\frac{1}{2}(\sigma_0+\sigma_m)$	$\sum_0$	
Площади ватерлиний	$S_0=\frac{2L}{n}\sigma_0$	$S_1=\frac{2L}{n}\sigma_1$	:	$S_m=\frac{2L}{n}\sigma_m$				
$V=2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum_0$								

Таблица 2

Вычисление V по первому правилу Симпсона

Номера шпангоутов	Множители Симпсона	Номера ватерлиний 0		1		2		:		m (ГВЛ)		Суммы функций ординат шпангоутов	Функции $1/2$ площадей шпангоутов
		$1/2$		2		1		:		$1/2$			
	$1/2$	y_{00}	$1/2\,y_{00}$	y_{01}	$1/2\,y_{01}$	y_{02}	$1/2\,y_{02}$			y_{0m}	$1/2\,y_{0m}$		
0		$1/2\,y_{00}$		$2y_{01}$		y_{02}				$1/2\,y_{0m}$		u'_0	$1/2\,u'_0$
	2	y_{10}	$2\,y_{10}$	y_{11}	$2y_{11}$	y_{12}	$2y_{12}$			y_{1m}	$2y_{1m}$		
1		$1/2\,y_{10}$		$2y_{11}$		y_{12}				$1/2\,y_{1m}$		u'_1	$2\,u'_1$
	1	y_{20}	y_{20}	y_{21}	y_{21}	y_{22}	y_{22}			y_{2m}	y_{2m}		
2		$1/2\,y_{20}$		$2y_{21}$		y_{22}				$1/2\,y_{2m}$		u'_2	u'_2
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
:		:		:		:					:	:	:
	$1/2$	y_{n_0}	$1/2\,y_{n0}$	y_{n1}	$1/2\,y_{n1}$	y_{n2}	$1/2\,y_{n2}$			y_{nm}	$1/2\,y_{nm}$		
		$1/2\,y_{n_0}$		$2y_{n1}$		y_{n2}				$1/2\,y_{nm}$		u'_n	$1/2\,u'_m$
Суммы функций ординат ватерлиний			σ'_0		σ'_1		σ'_2				σ'_m	╳	Σ_0
Множители Симпсона			$1/2$		2		1				$1/2$	╳	╳
Функции $1/2$ площадей ватерлиний			$1/2\,\sigma'_0$		$2\sigma'_1$		σ'_2				$1/2\,\sigma_m$	Σ_0	╳

Числа n и m при пользовании первым правилом Симпсона должны быть обязательно четными.

Схема расположения вычислений приведена в табл. 2.

Вычисление по правилу Чебышева

Правило Чебышева применяется обычно только для приближенного интегрирования по длине корабля. Для вычислений по правилу Чебышева необходимо построить чертеж чебышевских шпангоутов, или чебышевский корпус. Расстояния чебышевских шпангоутов, измеряемые от миделя симметрично в нос и в корму, определяются формулой:

$$X_i = x_i \frac{L}{2}, \tag{10}$$

где L — длина судна по грузовой ватерлинии.

Значения коэффициентов x_i для различного числа чебышевских ординат приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов x_i для различного числа чебышевских ординат

Число ординат Чебышева	Номера шпангоутов в нос и в корму от ⊠									
	⊠	1 и 1′	2 и 2′	3 и 3′	4 и 4′	5 и 5′	6 и 6′	7 и 7′	8 и 8′	9 и 9′
2	—	0,5773	—	—	—	—	—	—	—	
3	0	0,7071	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	0,1876	0,7947	—	—	—	—	—	—	—
5	0	0,3745	0,8325	—	—	—	—	—	—	—
6	—	0,2666	0,4225	0,8662	—	—	—	—	—	—
7	0	0,3239	0,5297	0,8839	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	0	0,1679	0,5288	0,6010	0,9116	—	—	—	—	—
10	—	0,0838	0,3127	0,5000	0,6873	0,9162	—	—	—	—
12	—	0,0669	0,2888	0,3667	0,6333	0,7112	0,9331	—	—	—
14	—	0,0581	0,2352	0,3380	0,5000	0,6619	0,7648	0,9419	—	—
18	—	0,0442	0,1995	0,2356	0,4160	0,5000	0,5840	0,7644	0,8005	0,9558

Таблица 4

Вычисление V по смешанному способу Чебышева и трапеций

Номера шпангоутов от носа к корме	Номера ватерлиний								
	0 киль	1	2	3	...	m (ГВЛ)	Суммы ординат шпангоутов	Поправки	Исправленные суммы (функции $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов)
1	y_{10}	y_{11}	y_{12}		...	y_{1m}	$\sum y_{1i}$	$\frac{1}{2}(y_{10}+y_{1m})$	u_1''
2	y_{20}	y_{21}	y_{22}		...	y_{2m}	$\sum y_{2i}$	$\frac{1}{2}(y_{20}+y_{2m})$	u_2''
3	y_{30}	y_{31}	y_{32}		...	y_{3m}	$\sum y_{3i}$	$\frac{1}{2}(y_{30}+y_{3m})$	u_3''
:	:	:	:		...	:	:	:	:
n	y_{n0}	y_{n1}	y_{n2}		...	y_{nm}	$\sum y_{ni}$	$\frac{1}{2}(y_{n0}+y_{nm})$	u_n''
Суммы ординат ватерлиний (функции $\frac{1}{2}$ площадей ватерлиний)	σ_0''	σ_1''	σ_2''		...	σ_m''	$\sum \sigma_i''$	$\frac{1}{2}(\sigma_0''+\sigma_m'')$	$\sum_0$

$$V = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0$$

Схема вычисления водоизмещения с интегрированием по длине по правилу Чебышева для n ординат с интегрированием по высоте по правилу трапеций и при нумерации шпангоутов от носа к корме приведена в табл. 4.

Площадь ватерлинии:

$$S_i = 2\frac{L}{n}(y_{1i} + y_{2i} + \ldots + y_{ni}) = 2\frac{L}{n}\sigma_i''. \tag{11}$$

Площадь шпангоута:

$$\omega_j = 2\frac{T}{m}\left[y_{j0} + y_{j1} + y_{j2} + \ldots + y_{jm} - \frac{1}{2}(y_{j0} + y_{jm})\right] = 2\frac{T}{m}u_j''. \tag{12}$$

Водоизмещение:

$$V = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\left[\sigma_0'' + \sigma_1'' + \ldots + \sigma_m'' - \frac{1}{2}(\sigma_0'' + \sigma_m'')\right] = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0 \tag{13а}$$

или

$$V = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}(u_1'' + u_2'' + \ldots + u_n'') = 2\frac{L}{n}\frac{T}{m}\sum\nolimits_0. \tag{13б}$$

Табл. 1, 2 и 4 являются типовыми и применяются для морских судов с обычными обводами. С помощью этих таблиц могут быть вычислены также площади шпангоутов и ватерлиний. Во многих случаях практики, особенно если требуется повышенная точность расчетов, применяют другие расчетные схемы, причем обычно пользуются правилом трапеций.

§ 4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА

Случай судна с большой цилиндрической вставкой и тупыми оконечностями. В этом случае считают отдельно водоизмещение оконечностей по какому-либо правилу и отдельно водоизмещение цилиндрической части по формуле

$$V_ц = \omega_{⊠} l_ц,$$

где $l_ц$ — длина цилиндрической части.

Применение добавочных ординат. В случае сильно закругленных обводов судна, например в районе скулы, применяют добавочные ординаты, делящие расстояние между основными ординатами на более мелкие равные промежутки. Применение добавочных ординат требует введения в суммы добавочных множителей перед ординатами, что осложняет схему расчета.

Пример. Пусть на рис. 3 $y_0, y_1, y_2, y_3, \ldots, y_m$ — основные ординаты, а y' и y'' — добавочные. Применяя правило трапеций, получаем приближенное выражение для площади кривой:

$$\omega = \frac{T}{m}\left(\frac{y_0}{4} + \frac{y'}{2} + \frac{y_1}{2} + \frac{y''}{2} + \frac{3}{4}y_2 + y_3 + \ldots + \frac{y_m}{2}\right).$$

Приведенные ординаты. 1. Кривые (ватерлинии или шпангоуты) весьма выпуклы в последнем промежутке и сильно отличаются от трапеции. В этом случае (рис. 4) вместо действительной крайней ординаты y_0 вводят приведенную ординату y'_0, получаемую проведением

Рис. 3.

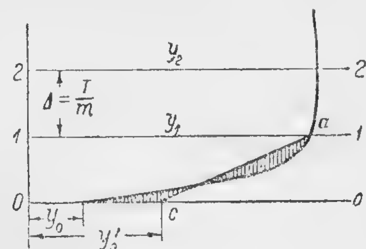


Рис. 4.

линии ac так, чтобы заштрихованные на чертеже площадки были равны. Оценка равенства площадей производится на-глаз.

2. Кривая пересекает последнюю (крайнюю) ординату y_0 (рис. 5). В этом случае проводят линию ac так, чтобы заштрихованные площадки были на-глаз равны. Затем из точки c проводят прямую $cN \parallel ab$. Отрезок aN будет крайней приведенной ординатой, которую следует ввести вместо y_0.

Если отрезок Oc оказывается бо́льшим, чем расстояние Δ между ординатами, следует ввести дополнительную ординату y'_{-1} (кривая II на рис. 5), заменяя на-глаз площадь кривой II в промежутке равновеликой трапецией.

3. Кривая притыкается к оси абсцисс между $(k - 1)$-й и k-той ординатами, причем k-тая ордината может быть как крайней табличной ординатой, так и промежуточной (рис. 6). В этом случае проводят линию ac так, чтобы заштрихованные площадки anb и bcd были равновелики. Затем из точки c проводят прямую $cN \parallel aO$. Отрезок ON будет отрицательной приведенной ординатой $-y_k$, которую следует вписать в таблицу. Очевидно, что $-y_k$ будет крайней ординатой для данной кривой, поэтому величина ее должна войти в выражение для применяющейся при правиле трапеций поправки на полусумму крайних. Ординаты кривых, имеющие номер больший, чем k, должны быть в таблице отмечены знаком тире, как не существующие вовсе.

Применение приведенных ординат требует раздельного вычисления площадей шпангоутов и ватерлиний, так как ординаты, построенные для шпангоутов, не пригодны для ватерлиний, и наоборот.

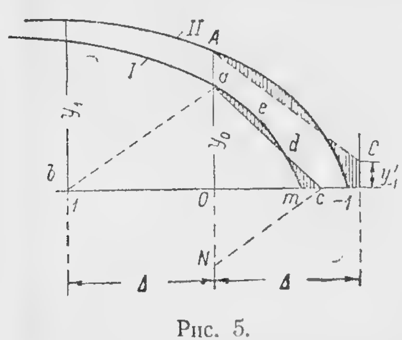


Рис. 5.

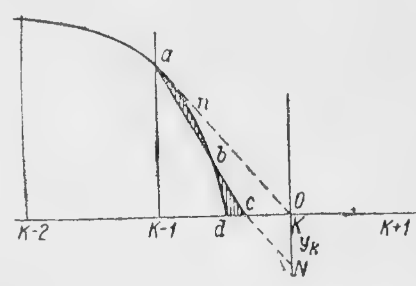


Рис. 6.

Способ поправок. Основная таблица для расчета площадей шпангоутов и ватерлиний строится по схеме табл. 1 в предположении, что все шпангоуты и ватерлинии оканчиваются у соответствующих ординат. В отдельном расчете вычисляются поправки к значениям площадей, учитывающие неточность, возникающую от первого предположения. Поправки эти вносятся в основную таблицу, после чего по исправленным значениям S и ω производится расчет водоизмещения.

Определение объема выступающих частей. Для определения объема выступающих частей (рули, винты, кронштейны гребных валов, наружная обшивка и др.) определенных правил не существует. Обычно при этом сообразуются с удобством и простотой вычислений, причем абсолютная погрешность их должна соответствовать абсолютной погрешности расчета главной части водоизмещения.

§ 5. ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ВЕЛИЧИНЫ

Координаты ЦВ определяются общими выражениями

$$x_c = \frac{M_{yz}}{V}; \quad y_c = 0; \quad z_c = \frac{M_{xy}}{V}, \qquad (14)$$

где M_{yz} и M_{xy} — статические моменты подводного объема относительно плоскостей yoz и xoy.

$$M_{yz} = \int_{L_к}^{L_п} x\omega\, dx; \quad M_{xy} = \int_0^T zS\, dz. \qquad (15)$$

Схема вычислений момента M_{yz} по правилу трапеций, Симпсона и Чебышева дана в табл. 5—7.

Схема вычислений момента M_{xy} по правилу Симпсона приведена в табл. 8.

Схема вычислений момента M_{xy} по правилу трапеций приведена в табл. 9.

При пользовании правилом трапеций (табл. 5 и 9) может быть достигнута большая точность, если взамен поправки Δ на полусумму крайних вводить поправку по следующим формулам:

При вычислении момента M_{yz}

$$\Delta_1 = \frac{1}{6}(3p+1)(u_p - u'_p). \tag{16}$$

При вычислении момента M_{xy}

$$\Delta = \frac{1}{6}[(3m+1)\sigma_m - \sigma_0]. \tag{17}$$

Таблица 5

Вычисление момента M_{yz} по правилу трапеций

Номера шпангоутов в нос и в корму от ⊗	Функции $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов: носовые, $u_н$	Функции $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов: кормовые, $u_к$	$u_н - u_к$	Произведения I · IV
I	II	III	IV	V
0	$u_{⊗}$	—	—	0
1	u_1	u'_1	$u_1 - u'_1$	$1(u_1 - u'_1)$
2	u_2	u'_2	$u_2 - u'_2$	$2(u_2 - u'_2)$
:	:	:	:	:
p'	u_p	u'_p	$u_p - u'_p$	$p(u_p - u'_p)$
Сумма				$\sum_0^p j(u_j - u'_j)$
Поправка				$\frac{1}{2}p(u_p - u'_p)$
Исправленная сумма				$\sum_1$
$M_{yz} = 2\left(\frac{L}{2p}\right)^2 \frac{T}{m} \sum_1$		$x_c = \frac{L}{2p} \frac{\sum_1}{\sum_0}$		

Примечания. 1. Обозначения u_j и $\sum_0$ соответствуют приведенным в табл. 1, причем число шпангоутных промежутков принято $n = 2p$.

2. Схема составлена в предположении, что расстояния между носовыми и кормовыми шпангоутами одинаковы и равны $\frac{L}{2p}$.

Таблица 6

Вычисление момента M_{yz} по правилу Симпсона

Номера шпангоутов в нос и в корму от ⊠	Суммы функций $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов		$u_н - u_к$	Множители Симпсона	Произведения I · IV · V
	носовых, $u_н$	кормовых, $u_к$			
I	II	III	IV	V	VI
0	u_0	—	—	1	0
1	u_1	u'_1	$u_1 - u'_1$	2	$1(u_1 - u'_1)2$
2	u_2	u'_2	$u_2 - u'_2$	1	$2(u_2 - u'_2)1$
:	:	:	:		:
$p-1$	u_{p-1}	u'_{p-1}	$u_{p-1} - u'_{p-1}$	2	$(p-1)(u_{p-1} - u'_{p-1})2$
p	u_p	u'_p	$u_p - u'_p$	$\frac{1}{2}$	$p(u_p - u'_p)\frac{1}{2}$
Сумма					Σ_1
$M_{yz} = \frac{4}{3}\left(\frac{L}{2p}\right)^2 \frac{2}{3} \frac{T}{m} \sum_1$			$x_c = \frac{M_{yz}}{V} = \frac{L}{2p} \frac{\Sigma_1}{\Sigma_0}$		

Примечание. Обозначения u_j и Σ_0 соответствуют приведенным в табл. 2, причем число шпангоутных промежутков принято $n = 2p$.

Таблица 7

Вычисление момента M_{yz} по правилу Чебышева

Номера шпангоутов в нос и в корму от ⊠	Коэффициенты Чебышева	Функции $\frac{1}{2}$ площадей шпангоутов		$u_н - u_к$	Произведения II · V
		носовых, $u_н$	кормовых, $u_к$		
I	II	III	IV	V	VI
0	0	u_0	—	—	0
1	x_1	u_1	u'_1	$u_1 - u'_1$	$x_1(u_1 - u'_1)$
:	:	:	:	:	:
p	x_p	u_p	u'_p	$u_p - u'_p$	$x_p(u_p - u'_p)$
Сумма					Σ_1
$M_{yz} = \frac{2L}{2p+1} \frac{L}{2} \frac{T}{m} \sum_1$			$x_c = \frac{L}{2} \frac{\Sigma_1}{\Sigma_0}$		

Примечание. Обозначения u_j и Σ_0 соответствуют приведенным в табл. 4, причем число чебышевских шпангоутов принято $n = 2p + 1$. В случае четного числа шпангоутов $n = 2p$ в таблице пропадает нулевая строка.

Таблица 8

Вычисление момента M_{xy} по правилу Симпсона

Номера ватерлиний	Функции $\frac{1}{2}$ площадей ватерлиний	Произведения I · II	Множители Симпсона	Произведения III · IV
I	II	III	IV	V
0	σ_0	0	$\frac{1}{2}$	0
1	σ_1	$1\sigma_1$	2	$1 \cdot \sigma_1 \cdot 2$
2	σ_2	$2\sigma_2$	1	$2 \cdot \sigma_2 \cdot 1$
3	σ_3	$3\sigma_3$	2	$3 \cdot \sigma_3 \cdot 2$
:	:	:	:	:
$m-1$	σ_{m-1}	$(m-1)\sigma_{m-1}$	2	$(m-1)\sigma_{m-1} \cdot 2$
m	σ_m	$m\sigma_m$	$\frac{1}{2}$	$m\sigma_m \frac{1}{2}$
Сумма				Σ_1
$M_{xy} = \frac{4}{3} \frac{L}{n} \left(\frac{T}{m}\right)^2 \sum_1$				

Примечание. Число m промежутков между ватерлиниями при вычислении по правилу Симпсона должно быть обязательно четным.

Таблица 9

Вычисление момента M_{xy} по правилу трапеций

Номера ватерлиний	Функции $\frac{1}{2}$ площадей ватерлиний	Произведения I · II
I	II	III
0	σ_0	0
1	σ_1	$1\sigma_1$
:	:	:
m	σ_m	$m\sigma_m$
Сумма		$\sum_1 i\sigma_i$
Поправка		$\frac{1}{2}(0 + m\sigma_m)$
Исправленная сумма		$\sum_1$
$M_{xy} = 2 \frac{L}{n} \left(\frac{T}{m}\right)^2 \sum_1; \quad z_c = \frac{T}{m} \frac{\Sigma_1}{\Sigma_0}$		

Примечание. Обозначения σ и Σ_0 соответствуют приведенным в табл. 1.

§ 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ АБСЦИСС ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ПЛОЩАДИ ВАТЕРЛИНИЙ

Абсциссы центра тяжести площади ватерлиний определяются общим выражением

$$x_f = \frac{m_y}{S}, \qquad (18)$$

где m_y — статический момент площади ватерлинии относительно миделя

$$m_y = 2 \int_{L_к}^{L_н} xy\,dx. \qquad (19$$

Схемы вычислений величин m_y и x_f по правилу трапеций и Чебышева приведены в табл. 10 и 11.

Таблица 10

Вычисление момента m_y и абсциссы x_f центра тяжести площади ватерлинии по правилу трапеций

Номера ординат в нос и в корму от ⊠	Ординаты ватерлинии		$y_н - y_к$	Произведения I · IV
	носовые, $y_н$	кормовые, $y_к$		
I	II	III	IV	V
0	y_0	—	—	0
1	y_1	y'_1	$y_1 - y'_1$	$1\,(y_1 - y'_1)$
2	y_2	y'_2	$y_2 - y'_2$	$2\,(y_2 - y'_2)$
:	:	:	:	:
p	y_p	y'_p	$y_p - y'_p$	$p\,(y_p - y'_p)$
Сумма				$\sum i\,(y_i - y'_i)$
Поправка				$-\frac{p}{2}\,(y_p - y'_p)$
Исправленная сумма $m_y = 2\left(\frac{L}{2p}\right)^2 \sum_2$	$x_f = \frac{L}{2p}\,\frac{\Sigma_2}{\sigma}.$			$\sum_2$

Примечания. 1. Обозначение σ соответствует принятому в табл. 1, причем число ординат принято $n = 2p + 1$.

2. Более точный результат будет получен, если величину поправки вычислить согласно формуле

$$\Delta = \frac{1}{6}\,(3p + 1)\,(y_p - y'_p).$$

Таблица 11

Вычисление момента m_y и абсциссы x_f центра тяжести площади ватерлинии по правилу Чебышева

Номера ординат в нос и в корму от ⊠	Коэффициенты Чебышева	Ординаты ватерлинии		$y_н - y_к$	Произведения II · V
		носовые, $y_н$	кормовые, $y_к$		
I	II	III	IV	V	VI
0	0	y_0	—	—	0
1	x_1	y_1	y_1'	$y_1 - y_1'$	$x_1(y_1 - y_1')$
2	x_2	y_2	y_2'	$y_2 - y_2'$	$x_2(y_2 - y_2')$
:	:	:	:	:	:
p	x_p	y_p	y_p'	$y_p - y_p'$	$x_p(y_p - y_p')$
Сумма					Σ_2
$m_y = \frac{2L}{2p+1}\frac{L}{2}\sum_2$	$x_f = \frac{L}{2}\frac{\Sigma_2}{\sigma}$				

Примечание. Обозначение σ то же, что в табл. 4, причем число ординат принято равным $n = 2p + 1$. В случае четного числа ординат нулевая строка в таблице исключается.

7. ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ПЛОЩАДИ ВАТЕРЛИНИИ И МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИХ РАДИУСОВ

Моменты инерции площади ватерлинии относительно главных центральных ее осей определяются общими выражениями:

относительно продольной оси

$$I_x = \frac{2}{3}\int_{L_к}^{L_н} y^3\,dx; \tag{20}$$

относительно поперечной оси

$$I_{yf} = 2\int_{L_к}^{L_н} x^2 y\,dx - Sx_f^2. \tag{21}$$

Метацентрические радиусы равны:

поперечный

$$r = \frac{I_x}{V}; \tag{22}$$

продольный

$$R = \frac{I_{yf}}{V}. \tag{23}$$

Схема вычисления момента инерции I_x по правилу трапеций и Чебышева приведена в табл. 12 и 13.

Таблица 12

Вычисление момента инерции I_x по правилу трапеций

Номера ординат от носа к корме	Ординаты ватерлинии, y	Кубы ординат, y^3
0	y_0	y_0^3
1	y_1	y_1^3
:	:	:
$n-1$	y_{n-1}	y_{n-1}^3
n	y_n	y_n^3
Сумма		$\sum y_i^3$
Поправка		$\frac{1}{2}(y_0^3+y_n^3)$
Исправленная сумма		$\sum_3$
$I_x=\frac{2}{3}\frac{L}{n}\sum_3$	$r=\frac{I_x}{V}$	

Таблица 13

Вычисление момента инерции I_x по правилу Чебышева

Номера ординат от носа к корме	Ординаты ватерлинии, y	Кубы ординат, y^3
1	y_1	y_1^3
2	y_2	y_2^3
:	:	:
$n-1$	y_{n-1}	y_{n-1}^3
n	y_n	y_n^3
Сумма		$\sum_3$
$I_x=\frac{2}{3}\frac{L}{n}\sum_3$	$r=\frac{I_x}{V}$	

Таблица 14

Вычисление момента инерции I_{yf} по правилу трапеций

Номера ординат в нос и в корму от ⊗	i^2	Ординаты ватерлинии: носовые, $y_н$	Ординаты ватерлинии: кормовые, $y_к$	$y_н+y_к$	Произведения II · V
I	II	III	IV	V	VI
0	0	y_0	—	y_0	0
1	1	y_1	y_1'	y_1+y_1'	$1\,(y_1+y_1')$
:	:	:	:	:	:
$p-1$	$(p-1)^2$	y_{p-1}	y_{p-1}'	$y_{p-1}+y_{p-1}'$	$(p-1)^2\,(y_{p-1}+y_{p-1}')$
p	p^2	y_p	y_p'	y_p+y_p'	$p^2(y_p+y_p')$
Сумма					$\sum i^2(y_i+y_i')$
Поправка					$\frac{p^2}{2}(y_p+y_p')$
Исправленная сумма					$\sum_4$
$I_{yf}=2\left(\frac{L}{2p}\right)^3\sum_4-Sx_f^2$			$R=\frac{I_{yf}}{V}$		

Схема вычислений момента инерции I_{yf} относительно центральной поперечной оси по правилам трапеций и Чебышева приведена в табл. 14 и 15.

При производстве вычислений следует с осторожностью относиться к применению приведенных ординат, предназначающихся для расчета площадей ватерлиний, так как эти ординаты не всегда пригодны для вычисления моментов инерции площадей. При вычислении метацентрических радиусов водоизмещение следует принимать с учетом выступающих частей.

Таблица 15

Вычисление момента инерции I_{yf} по правилу Чебышева

Номера ординат в нос и в корму от ⊗	Квадраты чебышевских коэффициентов, x_i^2	Ординаты ватерлинии		$y_н + y_к$	Произведения II · V
		носовые, $y_н$	кормовые, $y_к$		
I	II	III	IV	V	VI
0	0	y_0	—	y_0	0
1	x_1^2	y_1	y_1'	$y_1 + y_1'$	$x_1^2 (y_1 + y_1')$
2	x_2^2	y_2	y_2'	$y_2 + y_2'$	$x_2^2 (y_2 + y_2')$
:	:	:	:	:	:
p	x_p^2	y_p	y_p'	$y_p + y_p'$	$x_p^2 (y_p + y_p')$
Сумма $I_{yf} = 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 \frac{L}{2p+1} \sum_4 - Sx_f^2$			$R = \frac{I_{yf}}{V}$		$\sum_4$

§ 8. СТРОЕВЫЕ ПО ШПАНГОУТАМ И ВАТЕРЛИНИЯМ. КРИВАЯ ЧИСЛА ТОНН НА 1 *см* ОСАДКИ

Строевая по шпангоутам (рис. 7) представляет собой кривую, ординаты которой в принятом масштабе равны погруженным площадям шпангоутов по заданную ватерлинию, а абсциссы — положения шпангоутов по длине корабля.

Строевая по шпангоутам имеет следующие свойства:

1. Площадь строевой с учетом масштаба равна водоизмещению корабля.

2. Абсцисса ЦТ площади строевой по шпангоутам равна абсциссе ЦВ корабля.

3. Коэффициент полноты строевой равен коэффициенту продольной полноты корабля.

Строевая по ватерлиниям представляет собой кривую, ординаты которой показывают в принятом масштабе площадь ватерлинии в зависимости от углубления корабля.

Строевая по ватерлиниям обычно строится в предположении посадки судна прямо и на ровный киль и имеет следующие свойства:

1. Площадь строевой с учетом масштаба равна водоизмещению корабля.

2. Ордината ЦТ площади кривой равна возвышению ЦВ корабля над основной.

3. Коэффициент полноты площади строевой равен коэффициенту вертикальной полноты корабля.

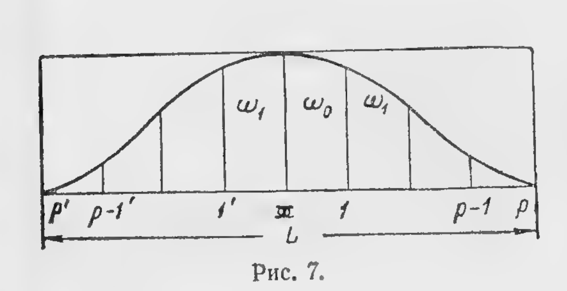


Рис. 7.

Рис. 8.

Вид строевой по ватерлиниям показан на рис. 8, причем по вертикальной оси откладывается углубление, а по горизонтальной — значения площади S.

Ординаты кривой числа тонн на 1 *см* осадки показывают, какое количество тонн должно быть принято или снято с судна для изменения его средней осадки на 1 *см*. Для построения кривой по вертикальной оси откладывается углубление, а по горизонтальной — числа тонн, определяемые по формуле

$$q = \frac{\gamma S}{100}.$$

Вид кривой подобен строевой по ватерлиниям (рис. 8). При изменении нагрузки судна на p тонн изменение его средней осадки приблизительно равно

$$\varepsilon = \frac{p}{q}.$$

Формула точна для судна с прямостенными обводами, борта которого вертикальны. Для судов, обводы которых отличаются от прямостенных, точность последней формулы будет уменьшаться с возрастанием величины p изменения нагрузки.

Под средней осадкой судна здесь следует понимать углубление его по сечению, проходящему через ЦТ площади ватерлинии. Для грубо приближенных расчетов можно принимать среднее углубление равным среднему арифметическому углублений носа и кормы.

§ 9. ГРУЗОВОЙ РАЗМЕР, ИЛИ КРИВАЯ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

Грузовым размером, или кривой водоизмещения, называется кривая, ординаты которой дают величину водоизмещения в функции от углубления корабля.

Кривая водоизмещения служит для быстрого определения водоизмещения при любом значении осадки судна на ровный киль. Вычисление ее сводится к вычислению интеграла с верхним переменным пределом

$$V_z = \int_0^z S\,ds. \tag{24}$$

Схема вычисления кривой объемного водоизмещения по правилу трапеций приведена в табл. 16.

Цифры V графы таблицы дают величины теоретического водоизмещения. Для получения действительного водоизмещения к ним прибавляется объем выступающих частей. Для перехода к кривой весового водоизмещения, цифры кривой водоизмещения умножаются на γ, где γ — вес единицы объема соленой воды. Общий вид грузового размера, или кривой водоизмещения, показан на рис. 9, причем по вертикальной оси

Рис. 9.

Таблица 16

Вычисление кривой водоизмещения

Номера ватерлиний	Функция площадей ватерлиний, σ	Суммы II попарно	Суммы III сверху	$V = \Delta T \Delta L \times \times \text{IV}$ [1])
I	II	III	IV	V
0	σ_0	0	0	0
1	σ_1	$\sigma_0 + \sigma_1$	$\sigma_0 + \sigma_1$	V_1
2	σ_2	$\sigma_1 + \sigma_2$	$(\sigma_0 + \sigma_1) + (\sigma_1 + \sigma_2)$	V_2
:		:	:	:
$m-1$	σ_{m-1}	:	:	:
m	σ_m	$\sigma_{m-1} + \sigma_m$	:	V_m
$m+1$	σ_{m+1}	$\sigma_m + \sigma_{m+1}$	:	V_{m+1}

[1]) Обозначения ΔT и ΔL равны соответственно расстояниям между ватерлиниями и шпангоутами, если величины σ вычислялись по правилу трапеций (см табл. 1). Если они вычислялись по правилу Чебышева, то $\Delta L = \frac{L}{n}$, где n — число чебышевских шпангоутов (см. табл. 4).

откладывается углубление, а по горизонтальной — величины водоизмещения. Грузовым размером можно пользоваться при осадке судна на ровный киль или при незначительном диференте. В последнем случае расчетное углубление судна должно относиться к сечению, проходящему через центр тяжести площади действующей ватерлинии.

При наличии масштаба Бонжана ординаты кривой водоизмещения могут быть также определены по формулам (25а) или (25б) путем производства вычислений по схеме табл. 18 для ряда осадок.

Кривая водоизмещения имеет следующие свойства:

1. Отношение отрезка AB на оси осадок от ватерлинии до точки B пересечения касательной к кривой водоизмещения с осью осадок к величине осадки AO корабля равно коэффициенту вертикальной полноты его по данную ватерлинию (рис. 10):

$$\frac{AB}{AO} = \frac{V}{ST} = \chi.$$

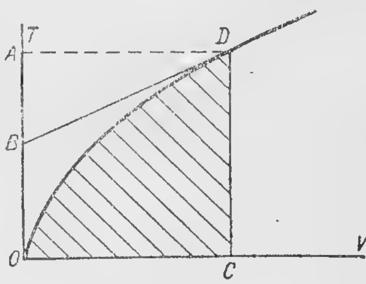


Рис. 10.

2. Площадь ODC между кривой водоизмещения и осью OV равна статическому моменту водоизмещения относительно основной плоскости:

$$M_{xoy} = \int_v z\,dv = Vz_c.$$

3. Площадь ADO между кривой водоизмещения, ватерлинией и осью осадок равна статическому моменту водоизмещения относительно плоскости ватерлинии:

$$M = \int_0^T v\,dz = (T - z_c)\,V.$$

§ 10. МАСШТАБ БОНЖАНА

Масштаб Бонжана служит для определения водоизмещения и положения ЦВ по длине корабля, а также для других расчетов, особенно при наличии значительного диферента. Ординаты масштаба Бонжана дают значения погруженной площади каждого шпангоута в зависимости от его углубления. Величина погруженной площади определяется выражением

$$\omega_z = 2\int_0^z y\,dz$$

и расчет ее сводится к вычислению интеграла с верхним переменным пределом. Схема вычисления масштаба Бонжана по правилу трапеций приведена в табл. 17.

Вид масштаба Бонжана для десяти шпангоутов показан на рис. 11. Для вычисления водоизмещения и положения ЦВ по масштабу Бонжана на нем прочерчивается согласно замеренным по маркам углуб-

Таблица 17

Вычисление кривой масштаба Бонжана для шпангоута № . .

Номера ватер-линий	Ординаты шпангоутов	Суммы II попарно	Суммы III сверху	Произведения $\omega = \Delta T \cdot \text{IV}$
I	II	III	IV	V
0	y_0	0	0	0
1	y_1	$y_0 + y_1$	$y_0 + y_1$	ω_1
2	y_2	$y_1 + y_2$	$(y_0+y_1)+(y_1+y_2)$	
:	:	:	:	
$m-1$	y_{m-1}			
m	y_m	$y_{m-1}+y_m$	:	
$m+1$	y_{m+1}	$y_m + y_{m+1}$	:	
:	:	:	:	

Таблица 18

Вычисление водоизмещения и абсциссы ЦВ по масштабу Бонжана для 21 равноотстоящего шпангоута

Номера шпангоутов	Множители	Площадь шпангоутов	Произведения II · III
I	II	III	IV
0	10	ω_0	$10\ \omega_0$
1	9	ω_1	$9\ \omega_1$
:	:	:	:
10	0	ω_{10}	$0\ \omega_{10}$
11	-1	ω_{11}	$-1\ \omega_{11}$
:	:	:	:
20	-10	ω_{20}	$-10\ \omega_{20}$
Сумма		$\sum' \omega_i$	$\sum' k\omega_i$
Поправки		$\frac{1}{2}(\omega_0 + \omega_{20})$	$5(\omega_0 - \omega_{20})$
Исправленная сумма		$\sum \omega_i$	$\sum k\omega_i$

ления осадкам носом и кормой ватерлиния и снимаются, как показано на рис. 11, величины ω.

Иногда на масштабе Бонжана вместо кривых площадей вычерчиваются кривые объемов. При равноотстоящих шпангоутах для каждого вычерчивается кривая, ординаты которой равны погруженным

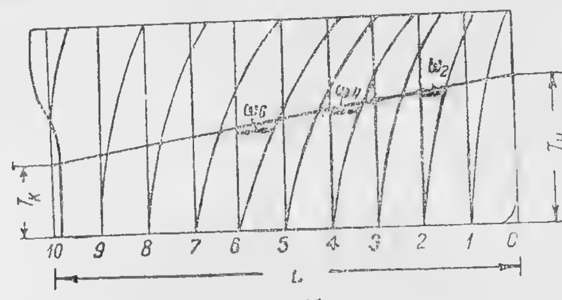


Рис. 11.

площадям шпангоута, умноженным на ΔL. Иногда же на масштабе Бонжана кривые погруженных площадей шпангоутов заменяют шкалами площадей.

Схема вычислений дана в табл. 18.

Водоизмещение и абсцисса ЦВ равны:

$$V = \Delta L \sum \omega_i + \delta V; \quad x_c = \frac{\Delta L^2 \sum k\omega_i + \delta m}{\Delta L \sum \omega_i + \delta V}, \qquad (25а)$$

где $\Delta L = \frac{L}{20}$ — расстояние между шпангоутами;

δV и δm — объем выступающих частей ниже ватерлинии ВЛ и их момент относительно плоскости мидель-шпангоута. Величины δV и δm рекомендуется указывать в примечании на чертеже масштаба Бонжана.

§ 11. ДИАГРАММА Г. А. ФИРСОВА

Диаграмма Г. А. Фирсова дает в графической форме зависимость между водоизмещением корабля, абсциссой ЦВ и осадками носом и кормой и может быть применена для решения задач, связанных с определением водоизмещения и абсциссы ЦВ при больших диферентах судна, а также для расчета непотопляемости.

Основное достоинство диаграммы состоит в том, что она позволяет находить величины V и x_c непосредственно по известным осадкам носом и кормой и потому является чрезвычайно полезной при проведении испытаний судна, когда нет времени на производство расчетов водоизмещения и положения ЦВ по масштабу Бонжана.

Общий вид диаграммы изображен на рис. 12. Диаграмма построена в прямоугольной системе координат, в которой по оси абсцисс отложены осадки корабля носом, а по оси ординат — осадки кормой по маркам углубления. Масштаб осадок на обеих осях одинаков, количество и цена делений осадок соответствуют градуировке корабельного фор- и ахтерштевня.

На диаграмме наносятся два семейства кривых: семейство кривых равного водоизмещения и семейство кривых равной абсциссы ЦВ.

Цифры, стоящие на кривых, показывают, к какому водоизмещению или к какой абсциссе ЦВ данная кривая относится. Интервалы между кривыми в каждом семействе соответствуют потребной точности отсчета водоизмещения и абсциссы ЦВ.

Способ пользования диаграммой иллюстрируется примером. Для корабля, к которому относится диаграмма на рис. 12, осадка носом составляет $T_н = 0{,}765$ *м* и кормой $T_к = 0{,}800$ *м*. По диаграмме находим $V = 20$ *м*^{3} и $x_c = -0{,}40$ в корму от миделя. При заданной величине водоизмещения $V = 21$ *м*^{3} и абсциссе ЦВ $x_c = -0{,}5$ *м* корабль будет иметь по диаграмме осадки $T_н = 0{,}775$ *м*; $T_к = 0{,}840$ *м*.

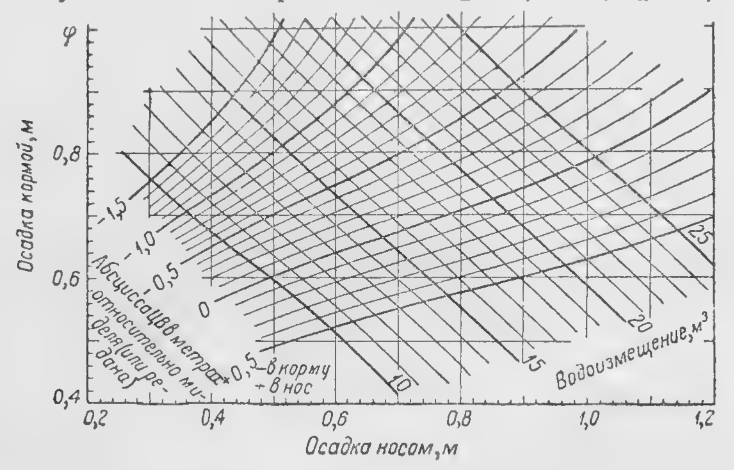


Рис. 12.

Для построения диаграммы необходимо располагать масштабом Бонжана корабля, построенным с учетом объема наружной обшивки и других выступающих частей и с нанесенными на нем марками углубления носом и кормой.

Первоначально с помощью масштаба Бонжана рассчитываются и строятся два чертежа вспомогательных кривых, подобные изображенному на рис. 13. По оси абсцисс в масштабе откладывается осадка $T_н$ носом, а по оси ординат также в масштабе величины V и x_c, соответствующие данной осадке $T_к$ кормой. На другом чертеже вспомогательных кривых по оси абсцисс откладывается осадка $T_к$ кормой, а по оси ординат те же величины V и x_c для данной осадки носом.

Для построения и расчета вспомогательных кривых устанавливают интервалы возможного изменения осадок носом и кормой и наносят их на соответствующем штевне масштаба Бонжана. Приняв за постоянную какую-нибудь осадку кормой по маркам углубления $T_{к1}$, проводят четыре или пять ватерлиний, соответствующих осадке кормой $T_{к1}$ и различным осадкам носа (также по маркам углубления)

в пределах установленного интервала и для каждой ватерлинии вычисляют по масштабу Бонжана V и x_c, например $T_к = 1,0$ *м* на рис. 13.

Далее принимают за постоянную другую осадку кормой $T_{к2}$ и вновь проводят четыре или пять ватерлиний, соответствующих тем же значениям осадки носом. Общее количество расчетных ватерлиний, необходимых для построения диаграммы, составит около 16—20 шт.

Схема вычислений при применении правила трапеций приведена в табл. 18.

В том случае, если длина носовой и кормовой частей корабля не одинакова, как это бывает у реданных катеров, где мидель-шпан-

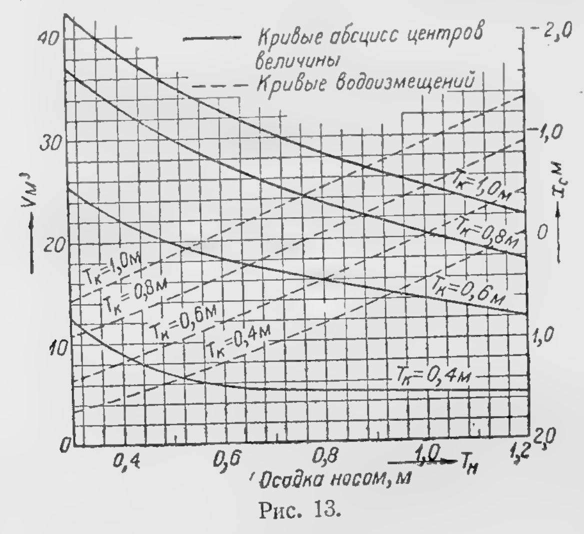


Рис. 13.

гоут считается совпадающим с сечением по редану, вычисления следует производить по правилу трапеций с учетом различной длины теоретической шпации в носовой и кормовой частях. Схема вычислений приводится в табл. 19.

От построенных указанным способом вспомогательных кривых переходят к основной диаграмме. Для этого, задаваясь значениями водоизмещения и абсциссы ЦВ, для которых желательно иметь кривые, определяют с помощью обеих вспомогательных диаграмм комбинации осадок носом и кормой, при которых имеет место заданное водоизмещение или абсцисса ЦВ. Например, значению $V = 18$ *м*³ на рис. 13 соответствуют комбинации осадок:

$T_к$	1,00	0,80	0,60	0,40
$T_н$	0,47	0,68	0,89	1,10

Точки, соответствующие найденным комбинациям осадок, наносятся на основную диаграмму и, будучи соединены плавной линией, дают искомые кривые постоянной V или постоянной x_c.

Водоизмещение и абсцисса ЦВ равны:

$$\left.\begin{aligned} V &= \Delta L_{н} \sum\nolimits_2 + \Delta L_{к} \sum\nolimits_3 + \delta V \\ x_c &= \frac{\Delta L_{н}^2 \sum_4 - \Delta L_{к}^2 \sum_5 + \delta m}{V} \end{aligned}\right\} \qquad (25б)$$

где δV — объем выступающих частей;

δm — момент объема выступающих частей относительно редана (указаны в примечании к масштабу Бонжана);

$\Delta L_{н}$ и $\Delta L_{к}$ — промежутки между носовыми и кормовыми шпангоутами.

Таблица 19

Расчет водоизмещения и абсциссы ЦВ

Номера шпангоутов от редана	Погруженные площади носовых шпангоутов	Погруженные площади кормовых шпангоутов	Произведения I · II	Произведения I · III
I	II	III	IV	V
0	$\omega_{н0}$ [1]	$\omega_{к0}$ [1]	0	0
1	$\omega_{н1}$	$\omega_{к1}$	$1\omega_{н1}$	$1\omega_{к1}$
:	:	:	:	:
n	$\omega_{нn}$	$\omega_{кn}$	$n\omega_{нn}$	$n\omega_{кn}$
Суммы	$\sum_2'$	$\sum_3'$	$\sum_4'$	$\sum_5'$
Полусумма крайних ординат	$\frac{\omega_{н0}+\omega_{нn}}{2}$	$\frac{\omega_{к0}+\omega_{кn}}{2}$	$\frac{n}{2}\omega_{нn}$	$\frac{n}{2}\omega_{кn}$
Исправленные суммы	$\sum_2$	$\sum_3$	$\sum_4$	$\sum_5$

§ 12. ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИВОЙ ОРДИНАТ ЦЕНТРА ВЕЛИЧИНЫ

Ординаты кривой возвышения центра величины над килем определяются выражением

$$z_c = \frac{\int_0^z z S dz}{V_z}. \qquad (26)$$

---

[1]) Для сечения по редану площади носового и кормового шпангоутов различны.

Таблица 20

Вычисление кривой z_c

Номера ватерлиний	Функции площадей ватерлиний, σ	Произведения I · II	Суммы III попарно	Суммы IV сверху	Функции водоизмещения (графа IV табл. 16)	Ординаты кривой $z_c = \Delta T \frac{V}{VI}$
I	II	III	IV	V	VI	VII
0	σ_0	0	0	0	0	0
1	σ_1	$1\sigma_1$	$0+1\sigma_1$	$0+1\sigma_1$	$(\sigma_0+\sigma_1)$	
2	σ_2	$2\sigma_2$	$1\sigma_1+2\sigma_2$	$(0+1\sigma_1)+(1\sigma_1+2\sigma_2)$	$(\sigma_0+\sigma_1)+(\sigma_1+\sigma_2)$	
3	σ_3	$3\sigma_3$	$2\sigma_2+3\sigma_3$	:	:	
:	:	:	:	:	:	
:	:	:	:	:	:	
$m-1$	σ_{m-1}					
m	σ_m					
$m+1$	σ_{m+1}					

Таблица 21

Вычисление кривой z_c

Номера ватерлиний	Функции площадей ватерлиний, σ	Произведения I · II	Суммы III попарно	Суммы IV сверху	Поправки $\frac{1}{3}\sigma_0 - \frac{1}{3}\sigma_i$	Суммы V + VI	Функции водоизмещения (графа IV табл. 16)	Ординаты кривой $z_c = \Delta T \cdot \frac{VII}{VIII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
0	σ_0	0	0	0	0			
1	σ_1	$1\sigma_1$	$0+1\sigma_1$	$0+1\sigma_1$	$\frac{1}{3}\sigma_0-\frac{1}{3}\sigma_1$			
2	σ_2	$2\sigma_2$	$1\sigma_1+2\sigma_2$	$0+1\sigma_1+1\sigma_1+2\sigma_2$	$\frac{1}{3}\sigma_0-\frac{1}{3}\sigma_2$			
3	σ_3	$3\sigma_3$	$2\sigma_2+3\sigma_3$	:	:			
:	:	:	:	:	:			
$m-1$	σ_{m-1}	$(m-1)\sigma_{m-1}$						
m	σ_m	$m\sigma_m$			$\frac{1}{3}\sigma_0-\frac{1}{3}\sigma_m$			

Схема вычисления величины z_c по правилу трапеций приведена в табл. 20.

Более точные результаты, особенно при малых осадках, дает схема, приведенная в табл. 21.

В тех случаях, когда для корабля имеется только кривая водоизмещения, можно с помощью ее вычислить кривую z_c по формуле:

$$z_c = T_z - \frac{\int_0^z V_z\, dz}{V_z}. \qquad (27)$$

Вычисления располагаются по схеме табл. 22.

Таблица 22

Вычисление кривой ординат ЦВ

Номера ватерлиний	Функции водоизмещения (графа IV табл. 16)	Суммы II попарно	Суммы III сверху	Погружение ЦВ под ВЛ $z_w = \frac{\Delta T}{2} \cdot \frac{IV}{II}$	Осадки по ватерлинии T_z	Ординаты $z_c = VI—V$
I	II	III	IV	V	VI	VII
0					0	
1					T_1	
2					T_2	
:					:	
$m—1$					T_{m-1}	
m					T_m	
$m+1$					T_{m+1}	

§ 13. ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИВОЙ АБСЦИСС ЦЕНТРА ВЕЛИЧИНЫ

Ординаты кривой абсцисс центра величины определяются выражением

$$x_c = \frac{\int_0^z x_f S\, dz}{V_z}. \qquad (28)$$

Схема вычислений ординат кривой приведена в табл. 23.

Таблица 23

Вычисление кривой абсцисс центра величины

Номера ватерлиний	Исправленная сумма по табл. 10 $\sum_2$	Сумма II попарно	Сумма III сверху	Функции водоизмещения (графа IV табл. 16)	Ординаты кривой $x_c = \Delta L \frac{IV}{V}$
I	II	III	IV	V	VI
0	$\sum_{20}$				
1	$\sum_{21}$				
2	$\sum_{22}$				
:	:				
$m-1$	$\sum_{2m-1}$				
m	$\sum_{2m}$				

При наличии масштаба Бонжана расчет кривой x_c может быть выполнен также по формулам (25а) или (25б) путем производства вычисления по схеме табл. 18 для ряда осадок.

§ 14. СВОДНАЯ ТАБЛИЦА РАСЧЕТОВ И ЧЕРТЕЖ КРИВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА

Расчеты водоизмещения и кривых элементов теоретического чертежа могут быть объединены в общей сводной таблице, принципиальная схема которой разработана И. А. Яковлевым.

Табл. 24 представляет численный пример подобной схемы расчета, составленной применительно к правилу трапеций.

Обычно расчет выполняется для 21 равноотстоящего шпангоута. Количество равноотстоящих ватерлиний бывает различным и соответствует количеству их на теоретическом чертеже, причем верхние ватерлинии проводятся обычно выше конструктивной. В приведенном примере расчет в целях сокращения доведен до четвертой ватерлинии.

В тех случаях, когда линия киля не совпадает с основной линией теоретического чертежа (подъем киля в оконечностях, строительный диферент) или когда корабль имеет резко выраженную скулу, приведенные ординаты, снятые с корпуса для получения уточненных площадей шпангоутов, не совпадают с приведенными ординатами, снятыми с полуширота для уточненного расчета элементов ватерлиний.

Если приведенных ординат мало или их значения, полученные обоими способами, мало отличаются одно от другого, можно принимать средние арифметические этих значений. В противном случае следует вписывать в таблицу двойные ординаты в виде дроби (над чертой ордината, приведенная по корпусу, под чертой — ордината, приведенная по полушироте).

В дальнейшем верхние ординаты должны учитываться только при вычислении площадей шпангоутов, нижние — при вычислении элементов площадей ватерлинии.

Заполняя таблицу, необходимо внимательно следить за концевыми ординатами кривых (шпангоута или ватерлинии), имея в виду, что нуль ставится только там, где кривая притыкается к диаметральной плоскости. Если же шпангоут притыкается выше данной ватерлинии или ватерлиния не доходит до данного шпангоута, вместо соответствующей ординаты ставится тире.

Во всех случаях, представляющих практический интерес, средняя осадка судна близка к осадке по конструктивную ватерлинию. Поэтому нет необходимости вычислять все элементы теоретического чертежа для ватерлиний *0*, *1* и *2*, а достаточно иметь для них значения входящих в дальнейший расчет интегральных сумм.

В верхней части таблицы против надписей „нос, корма" проставлены номера шпангоутов от носа к корме. В следующей графе проставлены множители n для вычисления статических моментов площадей и объемов по длине и затем квадраты их n^2 для вычисления моментов инерции площадей ватерлиний относительно поперечной оси. В графы y вписываются ординаты теоретического чертежа по каждому шпангоуту и каждой ватерлинии, причем ординаты, заключенные в скобки, являются приведенными. В графы $\sum y$ вписываются интегральные суммы ординат по каждому шпангоуту от нулевой ватерлинии, причем в случае двойных приведенных ординат суммируются только верхние. Заключенные в скобки крайние значения интегральных сумм $\sum y$ представляют собой приведенные величины их, определяемые графическим путем подобно приведенным ординатам ватерлиний. В столбцах ny, n^2y и y^3 для третьей, четвертой и расположенных выше ватерлиний вписаны соответствующие произведения ординат и кубы их. В случае двойных приведенных ординат при вычислении произведений и кубов принимаются нижние. В графы $n\sum y$ вписаны произведения интегральных сумм $\sum y$ на множители n.

Для десятого шпангоута произведения ny и $n\sum y$ равны нулю. Однако вместо нуля в соответствующие клетки вписываются исправленные суммы произведений для носовых шпангоутов.

В средней части таблицы (по высоте) в левых двух графах вписаны главные размерения и постоянные множители, фигурирующие в последующих вычислениях и определяемые с точностью не менее трех или даже четырех значащих цифр.

В строку „суммы" заносятся алгебраические суммы чисел для граф y, $\sum y$, n^2y и y^3 с нулевого по двадцатый шпангоут. Для граф ny и $n\sum y$ в эту строку записываются суммы лишь кормовых шпангоутов, т. е. с одиннадцатого по двадцатый.

При вычислении сумм ny и n^2y следует помнить, что поправки на полусумму крайних произведений не требуются лишь тогда, когда крайними являются произведения ординат нулевого и двадцатого шпангоутов.

В этом случае поправка уже введена в значение n или n^2

Таблица 24

Сводная таблица

	Номера шпангоутов	Множители, n	Квадраты множит., n^2	ОВЛ	1 ВЛ		2 ВЛ		3 ВЛ						4 ВЛ					
				y	y	$\sum y$	y	$\sum y$	y	ny	n^2y	y^3	$\sum y$	$n\sum y$	y	ny	n^2y	y^3	$\sum y$	$n\sum y$
	0	5	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(0,05) / (—0,12)	—0,60	—6,0	0	(—0,01)	0
	1	9	81	—	—	—	—	—	(0,03)	0,13	1,2	0	(0,03)	0,1	0,35	3,15	28,4	0,04	0,38	3,4
	2	8	64	—	—	—	(0,05)	(0,07)	0,46	3,68	29,4	0,10	0,51	4,1	0,87	6,96	55,7	0,66	1,84	14,7
	3	7	49	—	(—0,06) / (—0,02)	(—0,01)	0,36	0,30	0,87	6,09	42,6	0,66	1,53	10,7	1,33	9,31	65,2	2,35	3,73	26,1
Нос	4	6	36	—	0,06	(0,04)	0,67	0,73	1,25	7,50	45,0	1,95	2,65	15,9	1,73	10,38	62,3	5,18	5,63	33,8
	5	5	25	(—0,12) / (—0,06)	0,22	0,10	0,95	1,27	1,58	7,90	39,5	3,94	3,80	19,0	2,07	10,35	51,7	8,87	7,45	37,3
	6	4	16	(—0,20) / (—0,02)	0,42	0,22	1,21	1,85	1,86	7,44	29,8	6,43	4,92	19,7	2,34	9,36	37,4	12,81	9,12	36,5
	7	3	9	(—0,19) / (—0,04)	0,61	0,42	1,43	2,46	2,10	6,30	18,9	9,26	5,99	18,0	2,55	7,65	23,0	16,58	10,64	31,9
	8	2	4	(—0,14) / (0,07)	0,78	0,64	1,62	3,04	2,27	4,54	9,1	11,70	6,93	13,9	2,70	5,40	10,8	19,68	11,90	23,8
	9	1	1	(—0,01) / (0,08)	0,92	0,91	1,77	3,60	2,40	2,40	2,4	13,82	7,77	7,8	2,79	2,79	2,8	21,72	12,96	13,0
	10	0	0	0,10	0,99	1,09	1,84	3,92	2,45	45,98	0	14,71	8,21	109,2	2,84	64,75	0	22,91	13,50	220,5
	11	1	1	(0,17) / 0,10	0,99	1,16	1,84	3,99	2,45	2,45	2,5	14,71	8,28	8,3	2,84	2,84	2,8	22,91	13,57	13,6
	12	2	4	(0,18) / 0,15	0,93	1,11	1,79	3,83	2,41	4,82	9,6	14,00	8,03	16,1	2,80	5,60	11,2	21,95	13,24	26,4
	13	3	9	(0,19) / 0,18	0,84	1,03	1,70	3,57	2,34	7,02	21,1	12,81	7,61	22,8	2,74	8,22	24,7	20,57	12,69	38,1
	14	4	16	(0,20) / 0,18	0,71	0,91	1,54	3,16	2,20	8,80	35,2	10,65	6,90	27,6	2,63	10,52	42,1	18,19	11,73	46,9
Корма	15	5	25	(0,23) / 0,15	0,56	0,79	1,30	2,65	1,99	9,95	49,8	7,88	5,94	29,7	2,47	12,35	61,7	15,07	10,40	52,0
	16	6	36	(0,29) / 0,14	(0,38) / 0,42	0,67	0,96	2,01	1,68	10,08	60,5	4,74	4,65	27,9	2,21	13,26	79,5	10,79	8,54	51,2
	17	7	49	(0,27) / 0,14	0,28	0,55	(0,52) / (0,55)	1,35	1,22	8,54	59,8	1,82	3,09	21,6	1,82	12,74	89,2	6,03	6,13	42,8
	18	8	64	(0,18) / (0,23)	0,16 / (0,22)	0,34 / (0,46)	(0,12) / (0,26)	0,62 / (0,84)	0,50 / (0,76)	3,04	24,3	0,44	1,24	10,0	1,25	10,00	80,0	1,95	2,99	23,9
										—	—	—	(—0,61)	—2,8	(0,42)	1,89	17,0	0,07	(0,80)	3,6
	19	9	81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	5	50	—	—	—	—	—	—											

			ОВЛ y	1 ВЛ y	1 ВЛ $\sum y$	2 ВЛ y	2 ВЛ $\sum y$	3 ВЛ y	3 ВЛ ny	3 ВЛ n^2y	3 ВЛ y^3	3 ВЛ $\sum y$	3 ВЛ $n\sum y$	4 ВЛ y	4 ВЛ ny	4 ВЛ n^2y	4 ВЛ y^3	4 ВЛ $\sum y$	4 ВЛ $n\sum y$
$L = 21{,}0$ м	$2\Delta L = 2{,}10$ м	Суммы	1,48	8,93	10,09	19,84	38,64	30,32	54,70	480,7	129,62	87,47	161,2	38,63	77,42	739,5	228,33	157,23	298,5
		Поправки	0,08	0,10	0,23	0,15	0,45	0,40	—8,72	$\sum n^2y$	0,22	—0,29	—52,0	0,15	—12,67	$\sum n^2y$	0,03	0,40	—78,0
$B = 3{,}00$ м	$^2/_3\Delta L = 0{,}700$ м	Исправленные суммы	1,40	8,83	9,86	19,69	38,19	$\sum y$ 29,92	$\sum ny$		129,4	87,76	A	$\sum y$ 38,48	$\sum ny$		228,3	156,83	A
$\Delta L = 1{,}05$ м	$2\Delta L^3 = 2{,}32$ м³	Множители	0	1	—	2	—	3	1/3	B	$\sum y^3$	$\sum\sum y$		4	1/3	B	$\sum y^3$	$\sum\sum y$	
$\Delta T = 0{,}440$ м	$\Delta L \Delta T = 0{,}462$ м²	Произведения	0	8,8	8,8	39,4	57,0	89,7	10,0	186,1	176,1			153,9	12,8	429,7	416,9		

			1 ВЛ	2 ВЛ	3 ВЛ	4 ВЛ
Площадь ватерлинии	$2\Delta L \sum y$	м²	$S = 2{,}1 \cdot 8{,}8 = 18{,}5$	$S = 2{,}1 \cdot 19{,}7 = 41{,}3$	$S = 2{,}1 \cdot 29{,}9 = 62{,}7$	$S = 2{,}1 \cdot 38{,}5 = 80{,}9$
Абсцисса ЦТ площади ватерлинии	$\Delta L \frac{\sum ny}{\sum y}$	м			$x_f = 1{,}05 \frac{-8{,}72}{29{,}9} = -0{,}306$	$x_f = 1{,}05 \frac{-12{,}7}{38{,}5} = -0{,}347$
Водоизмещение	$\Delta L \Delta T \sum \sum y$	м³	$V = 0{,}462 \cdot 9{,}9 = 4{,}6$	$V = 0{,}462 \cdot 38{,}2 = 17{,}6$	$V = 0{,}462 \cdot 87{,}8 = 40{,}5$	$V = 0{,}462 \cdot 156{,}8 = 72{,}4$
Абсцисса ЦВ	$\Delta L \frac{A}{\sum\sum y}$	м			$x_c = 1{,}05 \frac{-52{,}0}{87{,}8} = -0{,}620$	$x_c = 1{,}05 \frac{-78{,}0}{156{,}8} = -0{,}523$
Ордината ЦВ	$\Delta T \frac{B}{\sum\sum y}$	м			$Z_c = 0{,}44 \frac{176{,}1}{87{,}8} = 0{,}88$	$Z_c = 0{,}44 \frac{416{,}9}{156{,}8} = 1{,}17$
Продольный момент инерции площади ватерлинии	$2\Delta L^3 \sum n^2y - Sx_f^2$	м⁴			$I_f = 2{,}32 \cdot 481 - 62{,}7\,(-0{,}306)^2 = 1110$	$I_f = 2{,}32 \cdot 740 - 80{,}9\,(-0{,}347)^2 = 1708$
Поперечный момент инерции площади ватерлинии	$2/3\Delta L \sum y^3$	м⁴			$I_x = 0{,}70 \cdot 129 = 90{,}4$	$I_x = 0{,}70 \cdot 228 = 159{,}5$
Продольный метацентрический радиус	$\frac{I_f}{V}$	м			$R = \frac{1110}{40{,}5} = 27{,}4$	$R = \frac{1708}{72{,}4} = 23{,}6$
Поперечный метацентрический радиус	$\frac{I_x}{V}$	м			$r = \frac{90{,}4}{40{,}5} = 2{,}23$	$r = \frac{159{,}5}{72{,}4} = 2{,}20$

Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

(5 или 50 вместо 10 или 100). В остальных случаях суммы должны быть исправлены вычитанием половины крайнего произведения.

В строку „поправки“ вписаны поправки на полусумму крайних ординат для столбцов y, $\sum y$ и y^3. Для граф ny и $n\sum y$ в эту строку пишутся разности сумм носовых и кормовых шпангоутов. Так, например, для графы $n\sum y$ 3-й ватерлинии в нее вписано $109{,}2 - 161{,}2 = -52{,}0$. В табл. 24 разность сумм ny обозначена через $\sum ny$, а разность сумм $n\sum y$ — через A.

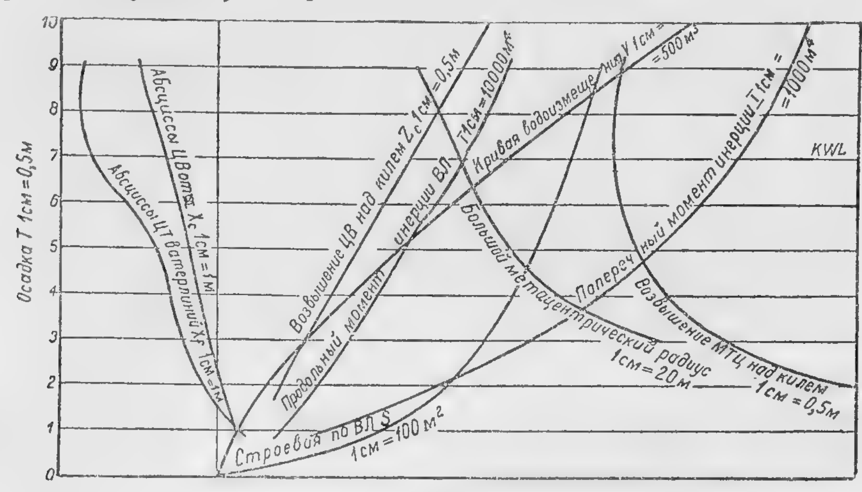


Рис. 14.

В строку „исправленные суммы“ записываются величины исправленных сумм для граф y, y^3 и $\sum y$. В таблице они обозначены соответственно $\sum y$, $\sum y^3$ и $\sum\sum y$.

В строку „множители“ записываются множители, равные под графами y номеру данной ватерлинии, а под графами ny — $^1/_3$.

В строку „произведения“ записываются под графами y произведения исправленных сумм $\sum y$ на вышестоящий множитель, под графами $\sum y$ — для 1-й и 2-й ватерлиний интегральные суммы этих произведений. Для расположенных выше ватерлиний интегральные суммы записываются под графами n^2y. Под графами ny в ту же строку записываются произведения исправленных сумм $\sum y$ на $^1/_3$. Под графами y^3 в строку заносятся исправленные интегральные суммы, получающиеся путем вычитания из интегральных сумм в графах n^2y поправок, равных $^1/_3$ $\sum y$. Величины исправленных интегральных сумм обозначены в таблице через B.

Последующий расчет производится в нижней части таблицы в указанном в ней порядке.

При выполнении расчета рекомендуется пользоваться вспомогательными вычислительными таблицами, приводимыми в приложении.

По данным расчета строится чертеж кривых элементов теоретического чертежа (рис. 14). Все кривые строятся в функции от

осадок и ординаты их откладываются параллельно основной. Названия отдельных кривых приведены на рисунке.

Масштабы кривых следует выбирать таким образом, чтобы пользование кривыми было достаточно просто и чтобы точность определения по ним искомой величины соответствовала практической потребности и той точности, с какой кривые были рассчитаны.

Кривые x_c и x_f следует строить в одинаковом масштабе. Если они пересекаются между собой, то в точках пересечения кривая x_c должна иметь или максимум, или минимум.

Кривые z_c и r также следует строить в одинаковом масштабе, причем значения r могут быть отложены от значений z_c. В этом случае на чертеже получается кривая возвышения метацентра над основной линией $z_m = z_c + r$.

§ 15. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ В. Г. ВЛАСОВА ω, b, c

Проф. В.Г. Власовым были предложены интегральные кривые ω, b, c, с помощью которых могут быть вычислены элементы судна, когда оно имеет любой диферент и крен.

Эти интегральные кривые строятся для сечений судна плоскостями шпангоутов. Для каждого из шпангоутов, которые выгоднее всего брать по правилу Чебышева, строятся три кривые:

1. Кривая ω, ординаты которой дают площади, отсекаемые от половины шпангоута ватерлинией, меняющей свое расстояние от основной плоскости xoy и параллельной ей.

2. Кривая b, ординаты которой дают моменты площади половины шпангоута, лежащей в одну сторону от диаметральной плоскости и отсекаемой той же ватерлинией относительно диаметральной плоскости. Кривая b называется также кривой моментов по ширине.

3. Кривая c, ординаты которой дают моменты той же площади половины шпангоута относительно основной плоскости. Кривая c называется также кривой моментов по высоте.

Ординаты интегральных кривых вычисляются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \omega &= \int_0^z y\,dz \\ b &= \frac{1}{2}\int_0^z y^2\,dz \\ c &= \int_0^z zy\,dz \end{aligned}\right\} \qquad (29)$$

Общий характер интегральных кривых показан на рис. 15, а схема вычисления их для одного из шпангоутов приведена в табл. 25. Здесь, как и раньше, через ΔT обозначено расстояние между ватерлиниями. Если это расстояние одинаково для всех шпангоутов, то вследствие седловатости возвышение $\Delta T'$ кромки палубы над верхней из равноотстоящих ватерлиний будет для разных шпангоутов

неодинаковым. Поэтому ординаты кривых по кромке палубы вычисляются по формулам:

$$\left.\begin{aligned}\omega_{н} &= \omega_m + \Delta\omega_{н}\\ b_{н} &= b_m + \Delta b_{н}\\ c_{н} &= c_m + \Delta c_{н}\end{aligned}\right\} \qquad (30)$$

Добавочные ординаты $\Delta\omega_{н}$, $\Delta b_{н}$ и $\Delta c_{н}$ вычисляются по формулам

$$\left.\begin{aligned}\Delta\omega_{н} &= \frac{1}{2}\Delta T'(y_m + y_{mн})\\ \Delta b_{н} &= \frac{1}{4}\Delta T'(y_m^2 + y_{mн}^2)\\ \Delta c_{н} &= \frac{1}{2}\Delta T'(z_m y_m + z_{н} y_{mн})\end{aligned}\right\} \qquad (31)$$

Здесь $y_{mн}$ — ширина шпангоута у палубы, $z_{mн}$ — возвышение ее над основной

$$z_{mн} = m\Delta T + \Delta T'.$$

Значения ординат интегральных кривых для осадки по ватерлинию WL_f, касательную к обводу бимса у диаметральной плоскости, определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned}\omega_f &= \omega_m + \Delta\omega_{н} + \Delta\omega_f\\ b_f &= b_m + \Delta b_{н} + \Delta b_f\\ c_f &= c_m + \Delta c_{н} + \Delta c_f\end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

где $\Delta\omega_f$, Δb_f и Δc_f — добавочные ординаты, относящиеся к площади шпангоута, заключенной между проходящей через кромку палубы

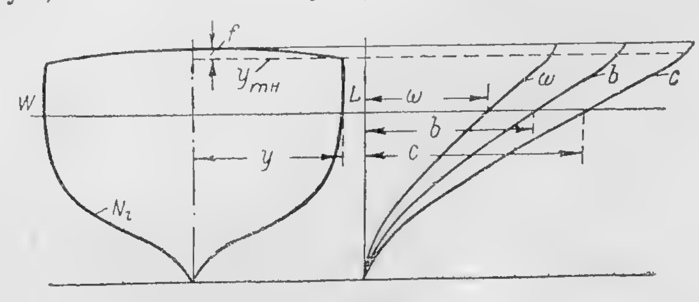


Рис. 15.

ватерлинией и линией бимса. Значения добавочных ординат определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\omega_f &= \frac{2}{3} f y_{mн}\\ \Delta b_f &= \frac{1}{4} f y_{mн}^2\\ \Delta c_f &= \left(z_{mн} + \frac{2}{5} f\right)\frac{2}{3} f y_{mн}\end{aligned}\right\} \qquad (33)$$

где f — стрелка погиби бимса.

Таблица 25

Схема вычисления ординат интегральных кривых ω, b, c шпангоута №. .

Номера ватерлиний	Ординаты шпангоутов, y	Сумма II попарно и сверху	Ординаты кривой $\omega = \frac{\Delta T}{2}$ III	y^2	Сумма V попарно и сверху	Ординаты $b = \frac{\Delta T}{4}$ VI	I · II	Сумма VIII попарно и сверху	Ординаты $c = \frac{\Delta T^2}{2}$ IX
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	y_0	0	0	y_0^2		0	0	0	0
1	y_1	y_0+y_1	ω_1	y_1^2		b_1	$1y_1$		c_1
2	y_2	$y_0+2y_1+y_2$	ω_2	y_2^2		b_2	$2y_2$		c_2
:	:	:	:	:		:	:		:
$m-1$	y_{m-1}			y_{m-1}^2			$(m-1)y_{m-1}$		
m	y_m		ω_m	y_m^2		b_m	my_m		c_m
$m_н$	$y_п$	$\Delta\omega_н$ [1]	$\omega_п$		$\Delta b_н$ [1]	$b_п$		$\Delta c_н$ [1]	$c_п$
m_f		$\Delta\omega_f$ [2]	ω_f		Δb_f [2]	b_f		Δc_f [2]	c_f

[1] Величины поправок вычисляются по формулам (31).
[2] Величины поправок вычисляются по формулам (33).

Положение ватерлинии на корабле задается тремя параметрами:

1) расстоянием $T_{\otimes}$ от начала координат до точки пересечения ватерлинии с осью oz;

2) углом θ между осью oy и линией пересечения плоскости ватерлинии с плоскостью миделя;

3) углом ψ между осью ox и линией пересечения плоскости ватерлинии с диаметральной плоскостью.

Если шпангоут $OABC$ (рис. 16) имеет абсциссу x_i, то расстояние $OA = T_{\otimes} + x_i \operatorname{tg}\psi$.

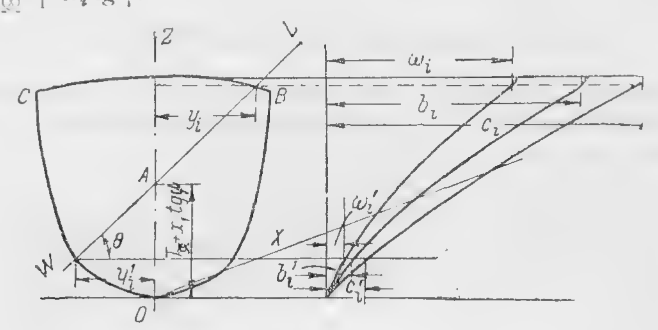


Рис. 16.

Площадь шпангоута, отсекаемая ватерлинией WL, имеющей параметры $T_{\otimes}$, θ и ψ, и ее статические моменты равны:

$$\left.\begin{aligned} \Omega_i &= \omega_i + \omega_i' - \frac{1}{2}(y_i^2 - y_i'^2)\operatorname{tg}\theta \\ B_i &= b_i - b_i' - \frac{1}{6}(y_i^3 + y_i'^3)\operatorname{tg}\theta \\ C_i &= c_i + c_i' - \frac{T_{\otimes}}{2}\operatorname{tg}\theta\,(y_i^2 - y_i'^2) - \\ &- \frac{1}{2}x_i(y_i^2 - y_i'^2)\operatorname{tg}\psi\operatorname{tg}\theta - \frac{1}{3}\operatorname{tg}^2\theta\,(y_i^3 + y_i'^3) \end{aligned}\right\} \quad (34)$$

Водоизмещение и координаты ЦВ для случая 9 чебышевских шпангоутов равны:

$$\left.\begin{aligned} V &= \frac{L}{9}\sum_{i=1}^{i=9}\Omega_i \\ x_c = \frac{M_{yz}}{V};\quad y_c &= \frac{M_{xz}}{V};\quad z_c = \frac{M_{xy}}{V} \end{aligned}\right\} \quad (35)$$

где

$$M_{yz} = \frac{L}{9}\sum x_i\Omega_i;$$

$$M_{xz} = \frac{L}{9}\sum B_i;$$

$$M_{xy} = \frac{L}{9}\sum C_i.$$

Схема вычисления водоизмещения и координат ЦВ приведена в табл. 57 (гл. IV, § 51).

Уравнения равновесия корабля при наличии крена и дифферента имеют вид (§ 2):

$$\left.\begin{aligned} D &= \gamma V \\ y_c - y_g &= (z_g - z_c)\,\mathrm{tg}\,\theta \\ x_c - x_g &= (z_g - z_c)\,\mathrm{tg}\,\psi \end{aligned}\right\} \quad (36)$$

§ 16. ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Графические методы расчета могут применяться при построении интегральных кривых, т. е. при вычислении интегралов с верхним переменным пределом.

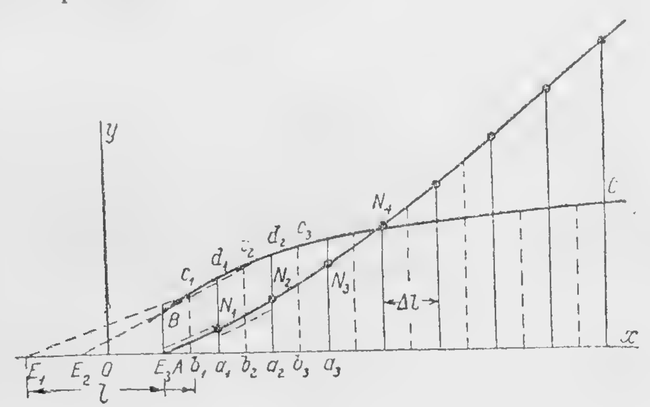


Рис. 17.

1. Построение первой интегральной кривой. Пусть BC — заданная кривая $y = f(x)$ (рис. 17). Требуется с помощью графического построения вычислить значения интеграла $F(x) = \int\limits_{x_0}^{x} f(x)\,dx$, где x_0 — абсцисса точки B.

Для этого строятся ординаты, соответствующие абсциссам x_0; $x_0 + \Delta l$; $x_0 + 2\Delta l \ldots$, промежутки между ними делятся пополам, и затем строится вторая серия ординат, показанная на рис. 17 пунктиром. От точки основания первой пунктирной ординаты откладывается отрезок $b_1E_1 = l$, который принимается за масштаб для площадей. Точка E_1 соединяется с точкой c_1 концом первой пунктирной ординаты, и через точку A — основание первой сплошной ординаты — проводится прямая AN_1, параллельная прямой E_1c_1. Точка N_1 будет принадлежать искомой кривой. Далее отрезок l откладывается от точки b_2 и точка E_2 соединяется с точкой c_2. Прямая N_1N_2, про-

веденная параллельно прямой E_2c_2, дает вторую точку N_2 искомой кривой. Длина l определяет масштаб кривой, т. е. дает площадь квадрата, сторона которого равна l.

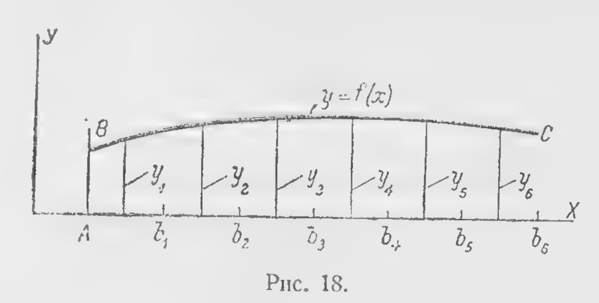


Рис. 18.

2. **Построение второй интегральной кривой.** Пусть BC — заданная кривая, представляющая функцию $y=f(x)$ (рис. 18). Требуется вычислить значения функции $\varphi(x)=\int_{x_0}^{x} dx \int_{x_0}^{x} f(x)\,dx$, т. е. результаты дважды повторенного интегрирования заданной функции $y=f(x)$.

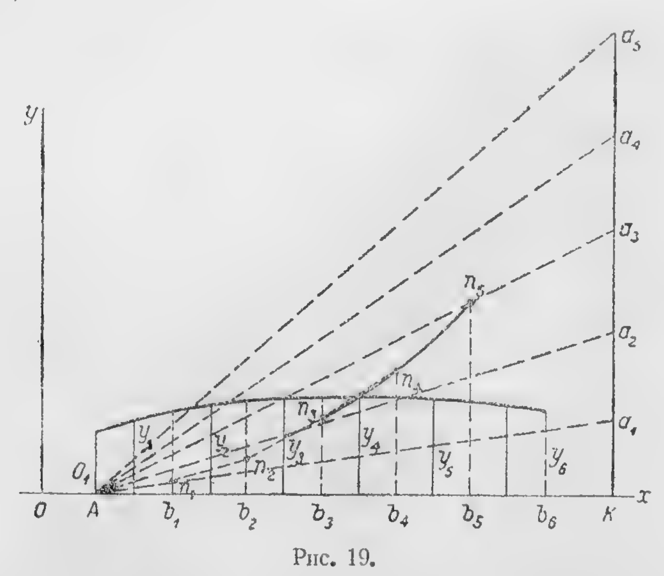


Рис. 19.

Для этого делается то же построение ординат, что и в случае получения первой интегральной кривой. Затем какая-нибудь длина O_1K принимается за единицу для построения кривой $\varphi(x)$. Проводится прямая O_1K и к ней в точке K перпендикуляр, по которому откладываются длины $Ka_1=y_1$; $a_1a_2=y_2$; $a_2a_3=y_3$ и т. д. (рис. 19).[1]

[1] На рис. 19 точка O_1 совмещена с точкой A.

Из точки O_1 проводятся лучи O_1a_1, O_1a_2, O_1a_3 и т. д. На прямой OX берется точка A, соответствующая абсциссе $x_0 = OA$, откладываются абсциссы Ob_1, Ob_2 и проводятся соответствующие им ординаты.

Затем из точки A проводится прямая, параллельная лучу O_1a_1, до пересечения в точке n_1 с первой ординатой; из точки n_1—прямая n_1n_2, параллельная лучу Oa_2, и т. д. Кривая $O_1n_1n_2$ и будет искомой кривой $\varphi(x)$.

§ 17. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ

Наиболее употребительными приборами для вычисления определенных интегралов в судостроительных расчетах являются планиметры, интеграторы и интеграфы.

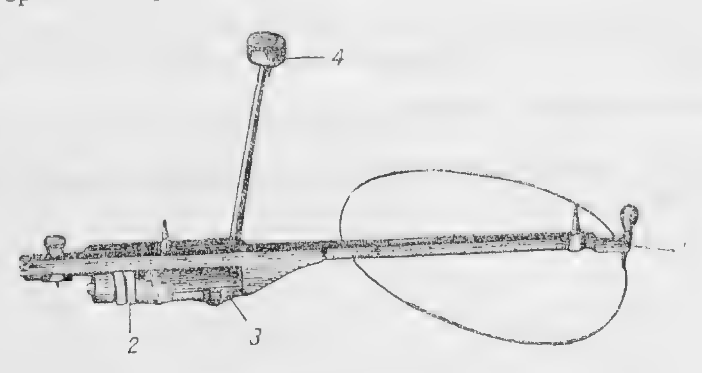


Рис. 20.

Планиметры. Планиметры служат для непосредственного определения площадей, ограниченных криволинейным контуром. Наиболее распространенным прибором является полярный планиметр (рис. 20), применяющийся обычно при обработке индикаторных диаграмм. Он состоит из двух стержней, соединенных в точке *3* шарниром. В точке *4* стержня имеется острый штифт, которым этот конец укрепляется неподвижно к чертежу. На конце *1* стержня укреплено острие, которым обводится контур измеряемой площади. На другом конце того же стержня помещается колесико *2*, имеющее обод с делениями и нониусом. С колесиком соединены два циферблатика с индексом, позволяющим учесть число полных оборотов колесика. Для измерения площади острие *4* закрепляется в любой точке вне измеряемого контура, а ведущий штифт *1* устанавливается на любой точке контура. После этого делают отсчет θ_1 по мерительному колесику *2* и штифтом *1* обводят контур, пока острие снова не придет в ту же точку. Сделав отсчет θ_2 по колесику, вычисляют величину площади по формуле:

$$\theta = k(\theta_2 - \theta_1),$$

где k — постоянный коэффициент прибора. Если этот коэффициент неизвестен, его определяют, обведя заранее известную по величине площадь.

Для определения площадей, сильно вытянутых в одном направлении ватерлиний, применяются линейные планиметры другой системы, где вместо неподвижного острия *4* прибор устанавливается на массивной каретке, движущейся вдоль измеряемой площади.

С помощью планиметра может быть быстро определено водоизмещение путем последовательного обвода контура погруженной части площадей шпангоутов. Если, например, имеется чебышевский корпус, начерченный в масштабе $1:m$, то водоизмещение корабля равно

$$V = \Delta L m^2 k \sum_{i=1}^{i=n} (\theta_i - \theta_{i_0}), \tag{37}$$

где $\theta_i - \theta_{i_0}$ — разность отсчетов по мерительному колесику после обвода контура погруженной площади i-го шпангоута.

Интегратор. Интегратор дает возможность определять площади, статические моменты и моменты инерции плоских фигур. Общий вид его приведен на рис. 21.

Рама *1* прибора катается на двух колесиках по прямолинейной канавке массивной стальной линейки. На раме сидит зубчатый сектор *2*, могущий вращаться вокруг оси.

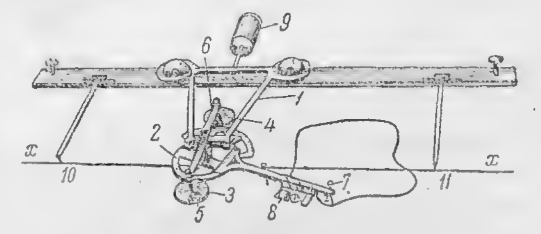


Рис. 21.

С сектором сцеплены диски *3* и *4*, несущие мерительные колесики *5* и *6*. Кроме того, с ним соединен рычаг, несущий на конце *7* ведущее острие и каретку с мерительным колесиком *8*; с другой стороны рамы укрепляется противовес *9*. Колесико *8* служит для определения площадей, колесико *5* — для статических моментов площадей относительно какой-либо оси xx и колесико *6* — для определения моментов инерции относительно той же оси. Перед началом работы линейка прибора устанавливается с помощью контрольных штифтов *10* и *11* параллельно оси xx. Затем ведущее острие *7* устанавливается в какой-либо точке контура и производится отсчет по всем колесикам. После этого площадь измеряемого контура обводится ведущим острием *7*, пока оно не вернется в первоначальную точку, и вновь производятся отсчеты по мерительным колесикам.

Допустим, что разности отсчетов по мерительным колесикам равны:

По колесику *8* . . . . f
" " *5* . . . . m
" " *6* i

Тогда площадь кривой $F = kf$.

Статический момент относительно оси xx: $M = k_2 m$.

Момент инерции относительно оси xx: $I = k_3 f - k_4 i$, где коэффициенты $k_1 - k_4$ — постоянные прибора. Величины этих постоянных могут быть проверены или определены вновь путем обвода площадей, для которых F, M, I являются заранее известными величинами.

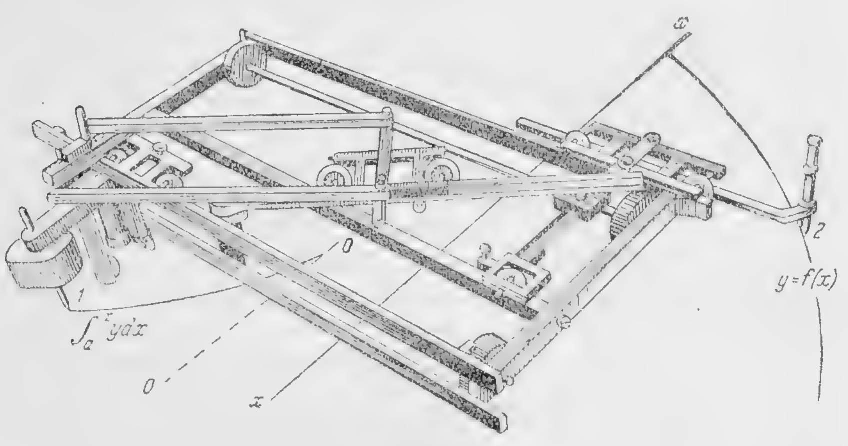


Рис. 22.

Интеграф. Интеграф служит для получения интегральных кривых. Общий вид интеграфа Абданк-Абакановича изображен на рис. 22.

Действие прибора следующее. Прибор устанавливается на чертеже так, чтобы он мог катиться в направлении оси xx, являющейся осью абсцисс заданной кривой. Средняя линейка ставится параллельно этой оси xx, а ведущий штифт 2 ставится на ось. При качении прибора по чертежу штифт 2 будет идти по оси xx, а пишущий штифт 1 прочертит линию $o - o$, являющуюся осью абсцисс для кривой площадей. После этого прибор вторично катят по чертежу, ведя штифтом 2 по заданной кривой $y = f(x)$. Штифт 1 при этом опишет интегральную кривую $F(x) = \int\limits_0^x f(x)\,dx$, масштаб которой зависит от установки прибора. Если масштаб неизвестен, он может быть установлен путем обвода кривой, площадь которой известна. Проще всего в качестве такой кривой принять прямую, параллельную оси абсцисс и лежащую от нее на расстоянии *a см*. Интегральная кривая должна получиться при этом в виде наклонной прямой, проходящей через начало координат. Ордината y_1 интегральной кривой при абсциссе x_1 равна $y_1 = kax_1$, где k — искомый масштаб, отсюда $k = \frac{y_1}{ax_1}$.

§ 18. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛОВУЧЕСТИ И НАЧАЛЬНОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ

Приводимые ниже формулы служат для быстрого приближенного определения различных элементов пловучести и начальной остойчивости судов по их главным размерениям и коэффициентам без помощи теоретического чертежа. Формулы эти выводятся либо теоретически путем замены обводов судна подходящими математическими кривыми, либо статистически.

Положение ЦВ по высоте

Ордината ЦВ по высоте выражается в долях осадки T следующим образом:

$$z_c = a_1 T, \tag{38}$$

где коэффициент a_1 всегда меньше единицы.

1. При замене строевой по ватерлиниям равновеликой параболой, степень которой определяется коэффициентом вертикальной полноты $\chi = \frac{\delta}{\alpha}$,

$$a_1 = \frac{1,5 - \chi}{2 - \chi}. \tag{39}$$

2. По формуле Поздюнина:

$$a_1 = \frac{1}{1 + \chi}. \tag{40}$$

3. По формуле Власова при $\chi < 0,85$:

$$a_1 = 0,372 + \frac{0,168}{\chi}. \tag{41}$$

4. По формуле Нормана:

$$a_1 = \frac{1}{3}(2,5 - \chi). \tag{42}$$

5. Для грубых прикидок можно принимать

$$a_1 = \frac{7}{12}. \tag{43}$$

Положение ЦВ по длине

1. По В. Г. Власову, абсцисса ЦВ может быть выражена в зависимости от объемов носовой $V_н$ и кормовой $V_к$ частей корабля (считая от миделя), площади миделя $\omega_{\otimes}$ и от коэффициента продольной полноты φ таким образом:

$$x_c \approx \frac{0,314}{\varphi} \frac{V_н - V_к}{\omega_{\otimes}}. \tag{44}$$

По Норману, абсцисса ЦВ может быть выражена в зависимости от тех же величин, что и по формуле В. Г. Власова:

$$x_c \approx 0{,}45 \frac{V_{н} - V_{к}}{\omega_{\otimes}}. \qquad (45)$$

Положение ЦТ ватерлинии по длине

1. Абсцисса ЦТ площади ватерлинии может быть определена по формуле

$$x_f = 0{,}45 \frac{S_{н} - S_{к}}{B}, \qquad (46)$$

где $S_{н}$ — площадь носовой, а $S_{к}$ — кормовой частей ватерлинии.

2. По В. Г. Власову, абсцисса ЦТ площади ватерлинии может быть определена по формуле

$$x_f = \frac{0{,}314}{\alpha} \cdot \frac{S_{н} - S_{к}}{B}. \qquad (47)$$

3. Норман рекомендует находить абсциссу x_f следующим построением (рис. 23). На чертеже полуширота проводят линию $CD \parallel AB$ на расстоянии $\frac{B}{4}$. Делят точкой E пополам длину CD и обозначают x

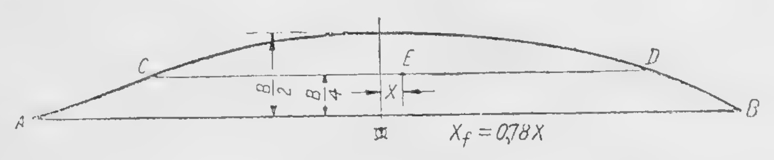


Рис. 23.

расстояние точки E от середины длины ватерлинии. Расстояние ЦТ от середины длины равно тогда

$$x_f = 0{,}78x. \qquad (48)$$

Поперечный метацентрический радиус. Поперечный метацентрический радиус может быть представлен следующим выражением:

$$r = a_2 \frac{B^2}{T}, \qquad (49)$$

где для коэффициента a_2 различные авторы дают следующие формулы:

1. По И. А. Яковлеву

$$a_2 = \frac{\alpha + \alpha^3}{24\delta}. \qquad (50)$$

2. По Фан-дер-Флиту

$$a_2 = \frac{\alpha^2}{11{,}4\delta}. \qquad (51)$$

3. По Власову

$$a_2 = \frac{1}{\delta}(0{,}0902\alpha - 0{,}0200). \qquad (52)$$

4. По Норману

$$a_2 = \frac{1}{\delta}(0{,}008 + 0{,}0745\alpha^2) \qquad (53)$$

или

$$a_2 = \frac{(0{,}72\alpha + 0{,}292)^3}{12\delta}. \qquad (54)$$

Продольный метацентрический радиус. Продольный метацентрический радиус может быть представлен выражением

$$R = a_3 \frac{L^2}{T}, \qquad (55)$$

где коэффициент a_3 равен:

1. По Норману

$$a_3 = \frac{1}{\delta}(0{,}008 + 0{,}077\alpha^3) \qquad (56)$$

или для более грубых приближений

$$a_3 = 0{,}0718 \frac{\alpha^2}{\delta}. \qquad (57)$$

2. По Власову

$$a_3 = \frac{1}{\delta}(0{,}1070\alpha - 0{,}0378). \qquad (58)$$

§ 19. ПЛОВУЧЕСТЬ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Для равновесия подводной лодки, плавающей без диферента под водой, необходимо соблюдение следующих условий:

$$\gamma V_0 = D, \qquad (59)$$

$$x_c = x_g; \qquad (60)$$

здесь D — вес подводной лодки со всеми запасами, но без учета принятой при погружении воды;

x_g — абсцисса центра тяжести веса D;

V_0 — объем подводной лодки, равный сумме:

1) объема прочного корпуса за вычетом объема внутренних цистерн главного балласта;

2) объема рубок и других частей, выступающих из прочного корпуса;

3) объема материала частей, находящихся вне прочного корпуса;

x_c — абсцисса центра величины объема V_0.

Вследствие малой сжимаемости воды уравнение (59) является условием безразличного равновесия, и поэтому подводная лодка, не имеющая хода, практически не может держаться на заданной глубине погружения без дополнительных приспособлений. При небольшом превышении веса подводная лодка будет медленно погружаться на дно, при недостатке же его она будет всплывать на поверхность, пока избыток объема не выйдет из воды и пловучесть подводной лодки не станет равной ее весу.

При ходе подводной лодки под водой способность ее держаться на заданной глубине обеспечивается действием вертикальных рулей.

Условие (60) также требует точного соблюдения, так как продольная остойчивость подводной лодки под водой равна ее поперечной остойчивости и во много раз меньше продольной остойчивости в надводном положении. Поэтому даже небольшие нарушения равенств (59) и (60) могут привести к значительному изменению глубины погружения и к появлению недопустимого диферента.

Ввиду этого определение водоизмещения подводной лодки и расчеты нагрузки ее должны производиться более точно, нежели это допускается для надводных судов. Расчет объемного водоизмещения лодки и координат ЦВ производится двумя способами. Первый способ сводится к тщательному вычислению и суммированию объема прочного корпуса, выступающих частей, объема материала проницаемых частей корпуса и объема цистерн главного балласта нетто. Для вычисления объема прочного корпуса его разбивают на участки, представляющие простые геометрические тела (цилиндры, усеченные конусы, сферические сегменты и т. п.), объемы и моменты которых рассчитываются по формулам стереометрии. Сумма всех указанных объемов составляет объемное водоизмещение лодки V_1.

Расчет по второму способу производится путем построения строевых по шпангоутам для ряда ватерлиний лодки. Планиметрированием строевых определяется водоизмещение лодки по соответствующие ватерлинии, т. е. ординаты грузового размера. Наибольшее водоизмещение лодки V_2 при полном погружении будет наибольшей ординатой грузового размера. Расхождение между величинами V_1 и V_2 не должно превышать $0{,}5\%$ объемного водоизмещения.

Вычисление ординат z_c кривой возвышения ЦВ производится по формуле

$$z_c = T_z - \int_0^z V\,dz. \qquad (61)$$

Величина определенного интеграла в формуле (61) рассчитывается путем определения планиметром соответствующей площади грузового размера.

Вычисление абсциссы ЦВ производится по обычной формуле

$$x_c = \frac{1}{V}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} x\omega\,dx, \qquad (62)$$

где ω — ординаты строевой по шпангоутам.

Во время похода равновесие лодки, выражаемое равенствами (59) и (60), нарушается в результате изменения веса, происходящего от расходования переменных грузов и изменения пловучести вследствие изменения удельного веса забортной воды. Для устранения влияния указанных изменений подводные лодки должны иметь помимо главных балластных цистерн, служащих для погружения, дополнительные си-

стерны, служащие для замещения расходуемых грузов, для регулирования диферента и т. д.

К переменным грузам, расходуемым во время похода, относятся торпеды, мины, артиллерийские боезапасы, топливо, смазочное масло, провизия, пресная вода. К числу переменных грузов может быть также условно отнесена добавочная пловучесть, появляющаяся в результате изменения удельного веса забортной воды.

Грузы, расходуемые сразу в большом количестве, как то: запасные торпеды, мины, боезапасы, требуют устройства специальных заместительных систерн, располагаемых вблизи расходуемых грузов.

Торпеды в аппаратах, мины в трубах и топливо замещаются приемом воды в те же аппараты, трубы и систерны, где эти грузы находились.

Прочие грузы, расходуемые постепенно во время похода, замещаются посредством уравнительных и диферентных систерн. Уравнительная систерна располагается в средней части лодки, вблизи ее ЦВ, диферентные систерны — в оконечности прочного корпуса.

При плавании подводной лодки в надводном положении часть водонепроницаемого объема ее выходит из воды. При этом имеет место равенство

$$v = W, \qquad (63$$

где v — объем непроницаемых частей корпуса выше ватерлинии;

W — объем свободных от воды систерн главного балласта.

Диферентующий момент подводной лодки в надводном положении равен

$$M_x = vx_v - Wx_w. \qquad (64)$$

Различают три надводных положения лодки:

1) крейсерское, при свободных от воды всех систернах главного балласта при закрытых кингстонах и вентиляции;

2) крейсерское положение на воздушных подушках во всех систернах главного балласта; в этом положении систерны главного балласта имеют открытые кингстоны и закрытую вентиляцию;

3) позиционное положение, когда свободна от воды лишь средняя систерна главного балласта.

Пловучесть лодки в надводном положении характеризуется кривыми, которые могут быть построены различными методами. Здесь приводятся методы переменного водоизмещения и выходящих объемов.

Диаграмма при пользовании методом переменного водоизмещения показана на рис. 24. Здесь, как и для надводных судов, кривая V — кривая водоизмещения в функции от осадки, кривые x_c и R дают абсциссу ЦВ и метацентрический радиус в функции от осадки, причем ординаты всех кривых откладываются в горизонтальном направлении. W_0L_0 — ватерлиния крейсерского положения.

Диферентующий момент для крейсерского положения

$$M_{x_0} = D_0(x_{g_0} - x_{c_0}), \qquad (65)$$

диферент

$$\psi \approx \frac{M_{x_0}}{D_0 R_0}, \quad (66)$$

где D_0 — весовое водоизмещение подводной лодки при крейсерском положении.

При плавании подводной лодки в ином положении водоизмещение ее определяется формулой

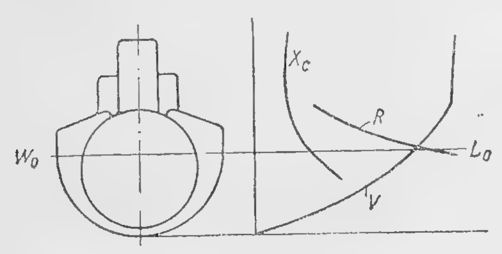


Рис. 24.

$$D = D_0 + q, \quad (67)$$

диферентующий момент

$$M_1 = D(x_g - x_c), \quad (68)$$

диферент

$$\psi \approx \frac{M_1}{DR}, \quad (69)$$

где q — вес принимаемого балласта.

x_c и R определяются по кривым для заданного $V = \frac{D+q}{\gamma}$. Абсцисса x_g центра тяжести подводной лодки определяется формулой

$$x_g = \frac{D_0 x_{g_0} + qx}{D_0 + q}. \quad (70)$$

Способ переменного водоизмещения удобен при рассмотрении остойчивости при погружении.

Диаграмма, соответствующая методу выходящих объемов, приведена на рис. 25. Здесь величины выходящих объемов измеряются по кривой V от вертикали $a—a$, а взамен кривой x_c дана кривая vx_v моментов объемов, расположенных выше ватерлинии.

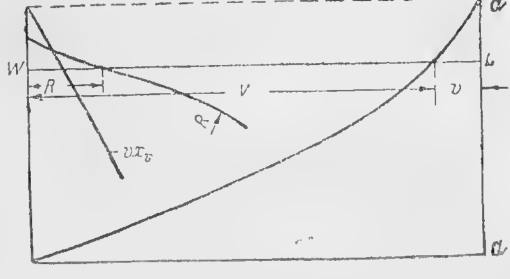


Рис. 25.

В этом случае имеем:

$$W = v, \quad (71)$$

$$M_k = vx_v - Wx_w, \quad (72)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{M_k}{VR}. \quad (73)$$

Способ выходящих объемов более точен и особенно удобен для пользования при малых величинах v.

Объем расположенных выше ватерлинии крейсерского положения непроницаемых частей корпуса определяет собой запас пловучести

лодки. При этом объем прочного корпуса с выступающими частями называется активным запасом плавучести, а объем цистерн главного балласта выше крейсерской ватерлинии — пассивным запасом плавучести. Различные типы подводных лодок имеют различную величину запаса плавучести. Для однокорпусных подводных лодок она колеблется в пределах 15—25%, для полуторакорпусных — 20—35% и для двухкорпусных — 30—45% от водоизмещения крейсерского положения.

§ 20. ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Основные принципы приближенных вычислений излагаются в т. 1 Справочника по судостроению, поэтому здесь приводятся лишь отдельные указания, имеющие приложение к расчетам теории корабля и сформулированные акад. А. Н. Крыловым.

Способ написания приближенных чисел должен быть таким, чтобы по нему можно было судить о степени точности числа. Поэтому такие числа следует писать так, чтобы в них все значащие цифры, кроме последней, были верны, и лишь последняя цифра была бы сомнительной и притом не более, чем на одну единицу.

Например, в числе 12 730 000 цифра 3 является сомнительной, и следовательно, абсолютная погрешность этого числа равна $\varepsilon = 10\,000$.

Для того чтобы резче отделить приближенные числа от абсолютно точных, их надо писать в виде десятичных дробей с множителем 10 в соответствующей степени. Например, число 12 730 000 следует писать:

$$1{,}273 \cdot 10^7.$$

Точно так же, чтобы показать, что число 57 приближенное и ошибка начинается с 5-го знака, надо его писать так:

$$57{,}000 \text{ или } 5{,}7000 \cdot 10^1.$$

Если же его написать $5{,}7 \cdot 10^1$, то это будет показывать, что цифра 7 сомнительная.

Наконец, если число 57 абсолютно точное, например 57 человек, то его следует писать 57, не ставя запятой и не прибавляя нулей.

При совершении арифметических действий с приближенными числами следует руководствоваться следующими указаниями.

При сложении в том случае, когда слагаемые приблизительно одинаковой величины (отношение наибольшего к наименьшему менее 10), надо все их писать с одним и тем же знаком; столько же знаков нужно удерживать и в сумме.

Если же приходится складывать числа, хотя и известные, с одинаковой степенью точности, но сильно разнящиеся по величине, тогда без ущерба для точности окончательного результата следует упрощать действия.

Пусть, например, надо сложить имеющие приблизительно одинаковую относительную погрешность пятизначные числа:

52,374; 2,8235; 0,014253; 0,52181.

Сложение следует производить так:

$$\begin{array}{r} 52,374 \\ 2,824 \\ 0,522 \\ 0,014 \\ \hline 55,734 \end{array}$$

т. е., написав наибольшее слагаемое, удерживать в остальных лишь столько цифр после запятой, сколько их у наибольшего числа.

При сложении большого количества слагаемых следует учитывать возможность взаимной компенсации погрешностей и вместо наибольшей возможной погрешности $n\delta$ вводить вероятную погрешность $\delta\sqrt{n}$, где δ — абсолютная погрешность, а n — число слагаемых.

При умножении ряда сомножителей в произведении следует удерживать столько цифр, сколько их в наименее точном из сомножителей. Это же правило распространяется и на деление, т. е. в частном нужно удерживать столько знаков, сколько их в делимом или в делителе, смотря по тому, что является менее точным.

При возвышении в степень относительная погрешность результата будет равна погрешности числа, умноженной на показатель степени. Так, относительная погрешность куба числа равна утроенной относительной погрешности этого числа.

Правило это распространяется и на дробные показатели.

Во многих вычислениях приходится составлять для заданной кривой суммы квадратов и кубов ординат, которые снимаются с чертежа. Если ордината известна с точностью до четвертого знака, т. е. три значащих цифры верны, а четвертая не верна или сомнительна, то и в квадрате и в кубе ее будут верными только две первые цифры, третья уже может быть сомнительной, а дальнейшие все будут неверны.

Поэтому неверные цифры не следует выписывать, а надо заменить их нулями, чтобы упростить вычисления.

При вычитании следует избегать вычисления малой разности больших величин, так как относительная погрешность такого вычисления весьма велика. Поэтому при вычислениях надо стремиться так преобразовывать формулы, чтобы малые разности двух величин вычислялись непосредственно, не вычисляя самих величин.

При пользовании логарифмами следует брать их с таким числом знаков, сколько знаков в подлежащих вычислению числах. Поэтому в теории корабля вполне достаточно четырехзначных таблиц, а в большинстве случаев и трехзначных. Взамен трехзначных таблиц проще пользоваться 25-сантиметровой логарифмической линейкой; 50-сан-

тиметровая же линейка дает почти такую же точность, как и четырехзначные логарифмы.

При выполнении приближенных вычислений следует руководствоваться следующими правилами, высказанными А. Н. Крыловым:

1. Точность данных и точность результата должны быть сообразованы с той практической потребностью, для которой вычисление производится.

2. При вычислениях с приближенными числами надо в каждом из них удерживать то число значащих цифр, которое необходимо для получения результата требуемой точности, помня, что всякая лишняя цифра лишь влечет бесполезную затрату труда и времени.

3. При вычислении по приближенным формулам величин площадей, объемов и т. д. надо брать такое число ординат, при котором точность формулы соответствует точности данных и требуемой точности результатов.

4. Малые изменения надо вычислять непосредственно, не вычисляя значений самой величины. При вычислении ряда близких значений величины надо, вычислив одно из них, для получения остальных вычислять к нему поправки.

5. Для всякого вычисления, в особенности, когда тому же ряду действий должен быть подвергнут целый ряд чисел, надо составить схему, располагая ее так, чтобы сложение и вычитание производились ранее умножения, которое предшествовало бы делению, и чтобы однообразный процесс действий не прерывался другим. При вычислении в каждом частном результате надо удерживать лишь то число значащих цифр, которое требуется для окончательного результата.

Для приблизительной оценки точности формул приближенного интегрирования приводятся табл. 26 и 27, содержащие результаты выполненного В. Г. Власовым исследования сравнительной точности различных правил. Названия правил даны в этих таблицах сокращенно таким образом, что стоящая впереди цифра указывает количество ординат, следующая за ней буква является первой начальной буквой правила (Т—трапеций, Ч—Чебышева и С—Симпсона), значок штрих вверху цифры, означающей число ординат, указывает на замену крайней ординаты приведенной, подстрочный индекс при цифре числа ординат указывает на количество добавочных ординат.

Например, наименование в табл. 26 правила $21''_2$Т для интегрирования по длине соответствует правилу трапеций с 21 ординатой, причем две крайние ординаты заменены приведенными и в каждой оконечности взяты две добавочные ординаты по середине крайних промежутков. Наименование 17_4Т для интегрирования по длине соответствует правилу трапеций с 17 основными ординатами и четырьмя добавочными по середине двух крайних промежутков в каждой оконечности.

Наименование 12Ч для интегрирования по длине соответствует правилу Чебышева с 12 ординатами — шестью носовыми и шестью кормовыми. Наименование 11_2С в табл. 27 для интегрирования по высоте соответствует правилу Симпсона с 11 основными ординатами и двумя добавочными в нижней части и т. д.

Таблица 26

Погрешности правил приближенного интегрирования (по длине)

№ по пор.	Наименование правил	Наиб. $\frac{\Delta s}{s}$ 100	Наиб. $\frac{\Delta i_x}{i_x}$ 100	Наиб. $\frac{\Delta i_y}{i_y}$ 100	Наиб. Δx_f 100	Наиб. Δy_f 100	Сумма погрешностей
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	18Ч	0,1	0,0	0,5	0,1	0,1	0,8
2	21_4С	0,2	0,1	0,7	0,1	0,1	1,2
3	14Ч	0,2	0,1	0,8	0,1	0,1	1,3
4	17_4С	0,2	0,1	0,9	0,1	0,1	1,4
5	$21''_2$Т	0,2	0,1	0,8	0,2	0,1	1,4
6	12Ч	0,2	0,2	0,9	0,1	0,2	1,6
7	$21''$Т	0,3	0,0	1,2	0,3	0,1	1,9
8	$17''_2$Т	0,3	0,2	1,2	0,3	0,1	2,1
9	13_4С	0,4	0,1	1,5	0,2	0,1	2,3
10	$17''$Т	0,4	0,0	1,7	0,4	0,1	2,6
11	21_4Т	0,5	0,2	1,6	0,3	0,1	2,7
12	21С	0,5	0,1	1,9	0,3	0,2	3,0
13	21_2Т	0,6	0,2	1,9	0,4	0,1	3,2
14	10Ч	0,4	0,5	1,9	0,3	0,3	3,4
15	17_4Т	0,7	0,3	2,1	0,5	0,2	3,8
16	17С	0,7	0,1	2,7	0,4	0,3	4,2
17	17_2Т	0,8	0,4	2,5	0,5	0,2	4,4
18	$13''_2$Т	0,5	0,3	1,9	0,6	0,2	3,5
19	$13''$Т	0,6	0,1	2,9	0,7	0,2	4,5
20	13_4Т	1,1	0,6	3,0	0,7	0,2	5,6
21	13С	1,0	0,4	4,2	0,6	0,4	6,6
22	13_2Т	1,2	0,6	3,6	0,8	0,3	6,5
23	21Т	1,2	0,0	4,6	0,8	0,4	7,0
24	9Ч	0,3	2,7	1,6	2,1	0,3	7,0
25	17Т	1,6	0,1	6,4	1,1	0,5	9,7
26	7Ч	0,7	5,2	3,6	0,5	0,7	10,7
27	13Т	2,5	0,1	9,7	1,7	0,8	14,8

В табл. 26 и 27 приведены наибольшие погрешности, полученные в результате применения правил приближенного интегрирования для ряда кривых, выражаемых уравнениями и похожих по своей форме на судостроительные кривые. Так как погрешность правила не зависит от масштаба кривой, а только от ее формы, то главные размеры OA и OB изображенной на рис. 26 кривой могли быть приняты равными единице. В таком случае площадь кривой OAB численно равна ее коэффициенту полноты, а координаты центра тяжести ее и моменты инерции являются относительными координатами и относительными моментами инерции. В таблицах они обозначены соответственно s, x_f, y_f, i_x, i_y.

В табл. 26 приведены наибольшие относительные погрешности в процентах при интегрировании по длине для величин s, i_x, и i_y и умноженные на 100 абсолютные погрешности относительных координат

Таблица 27

Погрешности правил приближенного интегрирования (по высоте)

№ по пор.	Наименование правил	Наиб. $\frac{\Delta s}{s} \cdot 100$	Наиб. $\Delta x_f \cdot 100$	Наиб. $\Delta y_f \cdot 100$	Сумма погрешностей
I	II	III	IV	V	VI
1	11_1Т	0,2	0,2	0,1	0,5
2	11′Т	0,3	0,3	0,1	0,7
3	$9'_1$Т	0,3	0,3	0,1	0,7
4	9Ч	0,4	0,2	0,1	0,7
5	9′Т	0,4	0,4	0,1	0,9
6	7Ч	0,5	0,3	0,1	0,9
7	6Ч	0,6	0,3	0,2	1,1
8	5Ч	0,6	0,3	0,3	1,2
9	11_2С	1,0	0,5	0,2	1,[illegible]
10	7_1Т	0,5	0,6	0,2	1,3
11	7′Т	0,6	0,7	0,2	1,5
12	9_2С	1,4	0,7	0,2	2,3
13	11_2Т	1,8	0,9	0,2	2,9
14	11_1Т	1,8	0,9	0,2	2,9
15	7_2С	2,0	1,0	0,2	3,2
16	9_2Т	2,1	1,2	0,2	3,5
17	9_1Т	2,4	1,2	0,2	3,8
18	11С	2,5	1,3	0,3	4,1
19	9[illegible]	3,3	1,7	0,3	5,3
20	7[illegible]Т	3,3	1,8	0,3	5,4
21	7_1Т	3,3	1,8	0,3	5,4
22	11[illegible]	4,1	2,2	0,4	6,7
23	7С	4,6	2,5	0,4	7,5
24	9Т	5,3	2,9	0,5	8,7
25	7Т	7,4	4,0	0,8	12,2

центра тяжести x_f и y_f. В последней графе приведены суммы всех пяти погрешностей, которые могут служить условной характеристикой точности соответствующих правил. Поэтому правила в табл. 26 расположены в порядке возрастания этих сумм.

Первые шесть правил В. Г. Власов рекомендует в качестве пригодных для окончательных расчетов, правила 7—17 рекомендуются им для предварительных расчетов и правила 18—27 вовсе не рекомендуются, как не гарантирующие необходимой точности. В группу нерекомендуемых входит также особенно распространенное правило Чебышева с 9 ординатами, не точное в отношении моментов инерции i_x и координат x_f.

В табл. 27 приведены наибольшие относительные погрешности при интегрировании по высоте для величин s и абсолютные погрешности для величин x_f и y_f. В последней графе приведены суммы погрешностей, которые рассматриваются, как условные характеристики

точности соответствующих правил. Последовательность расположения правил в табл. 27 соответствует возрастанию этих сумм.

В качестве правила, пригодного для окончательных вычислений, В. Г. Власов рекомендует первое, правила 2—9 рекомендуются им для предварительных расчетов, а правила 10—25 вовсе не рекомендуются.

Указанное разделение правил приближенного интегрирования по их пригодности к расчетам является условным и предполагает, что ошибки не должны превышать установленные пределы для всех исследованных кривых и всех элементов их. В тех случаях, когда на практике не требуется вычисления всех элементов, или если понижены требования к точности расчета, суждение о пригодности правил может изменяться.

В практических расчетах обычно применяется правило трапеций с 20 равноотстоящими шпангоутами, что обеспечивает достаточную точность расчетов для многих типов судов. Однако в пределах этого правила возможны значительные колебания в величине допущенной погрешности в зависимости от способов применения приведенных ординат, степень использования которых должна быть различна для разных типов судов.

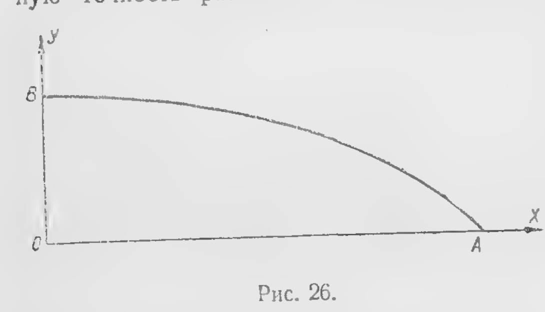


Рис. 26.

Для легких быстроходных кораблей или для судов с ограниченной осадкой, строящихся с соблюдением жесткой весовой дисциплины, а также для малоостойчивых судов точность расчетов должна быть выше и применение приведенных ординат должно быть проведено более тщательно и широко.

Для вспомогательных или грузовых тихоходных судов, имеющих большие запасы остойчивости без ограничения осадки, точность расчета может быть уменьшена, и приведенные ординаты могут применяться в минимальной степени.

Большая часть расчетов может производиться с помощью 25-*см* логарифмической линейки, обеспечивающей достаточную для практических целей точность. При проведении расчетов недопустимо округлять и необходимо удерживать все значащие цифры, которые могут быть получены на логарифмической линейке при вычислении таких величин, которые в дальнейшем входят в виде постоянных множителей в расчет, как, например, величины ΔL, ΔT, $(\Delta T)^2$ и т. п.

Выполнение расчетов облегчается применением приведенных в настоящем справочнике вспомогательных вычислительных таблиц, которые составлены с соблюдением принятых в кораблестроении правил приближенных вычислений.

ГЛАВА II

ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВ ПРИ МАЛЫХ НАКЛОНЕНИЯХ

§ 21. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Остойчивостью называется способность корабля, выведенного воздействием внешних сил из положения равновесия, возвращаться к нему после прекращения этого воздействия.

Учение об остойчивости судов делится обычно на две части:

1) остойчивость при малых наклонениях, или начальная остойчивость, причем под малыми наклонениями подразумеваются не превосходящие 10—20°;

2) остойчивость при больших наклонениях.

При исследовании остойчивости корабля достаточно рассмотреть величину ее при поперечных и продольных наклонениях корабля, сидящего прямо.

Наклонения корабля в поперечной плоскости вокруг оси ox называются креном, а соответственные углы наклонения — углами крена.

Наклонения корабля в продольной плоскости вокруг оси oy называются дифферентом, а соответствующие углы наклонения — углами дифферента.

Статическая остойчивость характеризуется величиной момента, стремящегося возвратить корабль в первоначальное положение равновесия, из которого он был выведен воздействием внешних сил.

Динамической остойчивостью называется величина работы восстанавливающего момента при отклонении корабля от первоначального положения равновесия до рассматриваемого положения.

Величина остойчивости судов зависит от их размеров, формы обводов и распределения грузов внутри корабля. Обычно корабль бывает остойчив, пока наклонение не превзошло некоторого предела, и неостойчив, когда оно больше этого предела.

Поэтому при рассмотрении остойчивости судов, особенно при поперечных наклонениях, нельзя ограничиться рассмотрением одной лишь начальной остойчивости, а необходимо исследовать также остойчивость на больших углах крена.

§ 22. ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЙ МОМЕНТ ПРИ МАЛЫХ НАКЛОНЕНИЯХ

При исследовании остойчивости рассматривается действие на корабль только моментов. Очевидно, что водоизмещение корабля при наклонениях его под действием моментов будет оставаться постоянным и наклонения будут равнообъемными. Согласно теореме Эйлера, для того чтобы малые наклонения были равнообъемными, необходимо, чтобы ось наклонений проходила через центр тяжести площади ватерлинии.

При равнообъемном наклонении корабля центр величины C корабля перемещается и занимает некоторое новое положение. Геометрическое место центров величины, отвечающих равнообъемным ватерлиниям, называется поверхностью C.

Линия, по которой перемещается центр величины при равнообъемных наклонениях в какой-либо определенной плоскости, называется траекторией C.

Проекция траектории C на соответствующую ей плоскость наклонения называется кривой C.

Радиус кривизны кривой C называется метацентрическим радиусом. Величина его определяется формулой

$$\rho = \frac{I_\xi}{V}, \tag{74}$$

где I_ξ — момент инерции площади ватерлинии относительно центральной оси $f\xi$, совпадающей с осью равнообъемного наклонения корабля;

V — водоизмещение корабля.

Центр кривизны кривой C называется метацентром.

Величина восстанавливающего момента при малых наклонениях определяется метацентрической формулой остойчивости.

При крене корабля на какой-либо борт (рис. 27), центр тяжести его G остается на месте, а центр величины C переместится относительно корабля в сторону наклонения и займет положение C_1. Сила веса D, приложенная в центре тяжести, и сила поддержания γV, приложенная в новом центре величины, образуют пару, момент которой и является восстанавливающим моментом, характеризующим остойчивость корабля. При малых наклонениях в поперечной плоскости, т. е. при малых углах крена, кривая CC_1, являющаяся кривой C, может быть принята за окружность с центром кривизны в точке M.

Радиус кривизны кривой C при поперечном наклонении или крене называется малым метацентрическим радиусом и равен

$$r = \frac{I_x}{V}, \tag{75}$$

где I_x — момент инерции площади ватерлинии относительно оси x, являющейся осью наклонения;

V — водоизмещение корабля.

Точка M, являющаяся центром кривизны кривой C и лежащая на пересечении линии силы поддержания с диаметральной плоскостью корабля, называется **поперечным**, или **малым**, **метацентром**.

Из рис. 27 видно, что момент восстанавливающей пары

$$M = D \cdot \overline{GK} = D(\overline{C_0M} - \overline{C_0G}) \sin\theta = D(r - a)\sin\theta, \qquad (76)$$

где a — возвышение центра тяжести судна над центром величины.

Выражение (76) представляет метацентрическую формулу остойчивости. Для малых углов можно принять $\sin\theta \cong \theta$, и тогда метацентрическая формула принимает вид

$$M = D(r - a)\theta. \qquad (77)$$

Отрезок $r - a$, представляющий возвышение поперечного метацентра M над центром тяжести G, называется **поперечной**, или **малой**, **метацентрической высотой**, и обозначается буквой

$$h = r - a = z_c + r - z_g. \qquad (78)$$

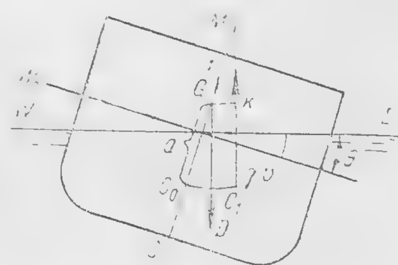


Рис. 27.

При действии на корабль кренящей пары $\mathfrak{M}$ угол крена определится из условия равенства кренящего и восстанавливающего моментов:

$$\theta = \frac{\mathfrak{M}}{Dh}. \qquad (79)$$

При наклонении корабля в продольной плоскости на угол ψ величина восстанавливающего момента определяется аналогичной формулой (рис. 28)

$$M = D(R - a)\psi, \qquad (80)$$

где R — продольный, или большой, метацентрический радиус;

$$R = \frac{I_{yf}}{V}. \qquad (81)$$

Величина $R - a$ равна возвышению продольного метацентра M над центром тяжести корабля и называется его **продольной**, или **большой**, **метацентрической высотой**

$$H = R - a = z_c + R - z_g. \qquad (82)$$

При действии на судно диферентующего момента $\mathfrak{M}_1$ величина продольного наклонения определяется путем приравнивания восстанавливающего момента диферентующему:

$$\psi = \frac{\mathfrak{M}_1}{D(R - a)}. \qquad (83)$$

Ось наклонения при этом проходит через ЦТ площади ватерлинии.

Продольная остойчивость судна всегда на много больше поперечной, так как продольный метацентр его всегда лежит гораздо выше поперечного.

Из рассмотрения рис. 27 видно, что для остойчивости судна необходимо, чтобы поперечный метацентр лежал выше центра тяжести,

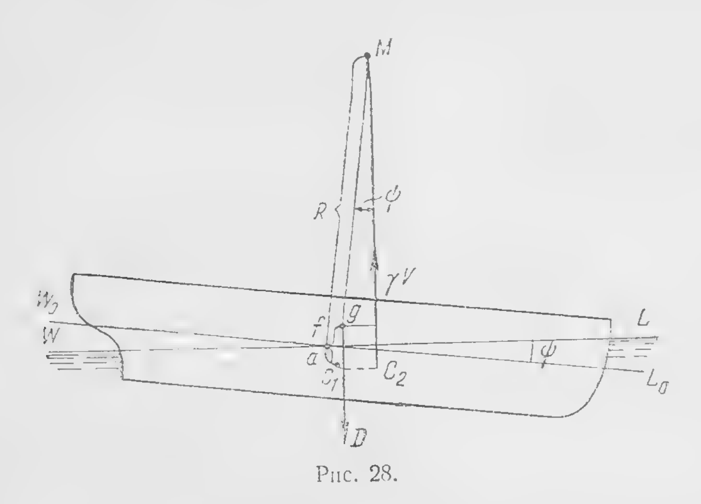


Рис. 28.

т. е. чтобы метацентрическая высота его $h = r - a$ была положительна. Такое судно называется обладающим положительной начальной остойчивостью.

Если судно имеет отрицательную метацентрическую высоту, т. е. центр тяжести его лежит выше метацентра (рис. 29), оно не будет остойчивым в прямом положении, так как появляющаяся при отклонении восстанавливающая пара будет стремиться дальше отклонить судно от прямого положения равновесия. Такое судно называется обладающим отрицательной начальной остойчивостью.

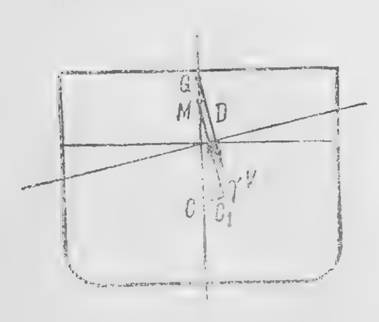


Рис. 29.

Произведение $D(r-a)$ называется коэффициентом поперечной остойчивости, а произведение $D(R-a)$ коэффициентом продольной остойчивости.

Метацентрическая формула остойчивости применима для углов крена, не превосходящих 10—20°. Относительная точность ее тем больше, чем больше величина метацентрической высоты. Для судов с обводами, приближающимися к круговым, точность формулы выше, чем для судов с прямостенными обводами.

Для прямостенных судов более точный результат дает формула

$$M = D\left(h + \frac{r}{2}\operatorname{tg}^2\theta\right)\sin\theta. \qquad (84)$$

§ 23. МОМЕНТ, КРЕНЯЩИЙ НА 1°, И МОМЕНТ, ДИФЕРЕНТУЮЩИЙ НА 1 *см*

Величина момента, кренящего судно на 1°, получается из метацентрической формулы поперечной остойчивости (79), если положить угол крена θ равным $1° = \frac{1}{57,3}$:

$$M_0 = \frac{Dh}{57,3}. \qquad (85)$$

Знание величины M_0 позволяет быстро определить крен судна в градусах под действием заданной пары $M_{кр}$:

$$\theta° = \frac{M_{кр}}{M_0}. \qquad (86)$$

Момент, диферентующий судно на 1 *см*, получается из метацентрической формулы продольной остойчивости, если принять в ней $\psi = \frac{0,01}{L}$:

$$\mathfrak{M}_0 = \frac{DH}{100L}. \qquad (87)$$

При действии на судно диферентующего момента $\mathfrak{M}_д$ изменение диферента в сантиметрах (т. е. изменение разности осадок носом и кормой) равно

$$\Delta = \frac{\mathfrak{M}_д}{\mathfrak{M}_0}. \qquad (88)$$

§ 24. ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТАЦЕНТР

При равнообъемном наклонении непрямостенного корабля на конечный малый угол $\delta\theta$ действующая ватерлиния не будет проходить через точку O, являющуюся следом линии пересечения ватерлинии прямого положения с диаметральной плоскостью (рис. 30). Толщина ε слоя между ватерлиниями WL'_θ и WL_θ определяется формулой

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\eta\delta\theta, \qquad (89)$$

где $\eta = Of$ — расстояние между осями, проходящими через ЦТ O первоначальной ватерлинии W_0L_0 и через ЦТ f' ватерлинии WL'_θ. Кривая Oef является геометрическим местом центров тяжести равнообъемных ватерлиний и называется катящейся кривой, так как при равнообъемном наклонении судно как бы катится этой кривой по поверхности воды.

Центр кривизны K катящейся кривой называется **диференциальным метацентром**. Радиус кривизны $\varkappa = OK$ катящейся кривой определяется выражением

$$\varkappa = \frac{dI_x}{dV}. \tag{90}$$

Очевидно, что у судов с развалистым бортом, подобных изображенному на рис. 30, момент инерции растет с увеличением водоизмещения и, следовательно, $\frac{dI_x}{dV} > 0$. У таких судов катящаяся кривая имеет вогнутость кверху, и диференциальный метацентр K лежит выше ватерлинии. У судов с заваленным бортом $\varkappa = \frac{dI_x}{dV} < 0$ и, следовательно, диференциальный метацентр ниже ватерлинии.

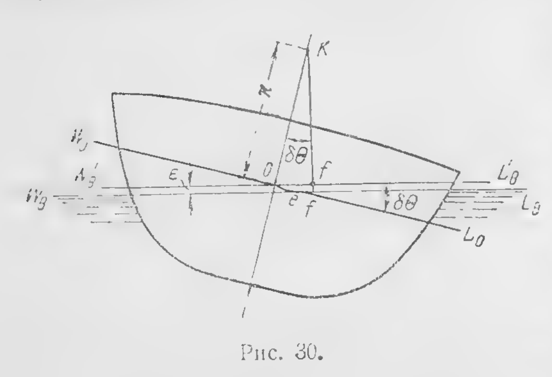


Рис. 30.

У судов прямостенных $\varkappa = 0$, катящаяся кривая обращается в точку, и диференциальный метацентр лежит в плоскости ватерлинии.

Между радиусом кривизны $\varkappa$ и метацентрическим радиусом существует диференциальная зависимость:

$$\frac{\partial r}{\partial V} = \frac{1}{V}(\varkappa - r). \tag{91}$$

Из этой зависимости следует, что при $\varkappa > r$ метацентрический радиус r растет с увеличением осадки, а при $\varkappa < r$ — уменьшается.

§ 25. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНОСА ГРУЗА НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И ПОСАДКУ КОРАБЛЯ

Пусть первоначальные координаты центра тяжести переносимого груза равны x_1, y_1, z_1, а новые — x_2, y_2, z_2. Вес груза обозначен через P.

Изменение поперечной и продольной метацентрической высоты при вертикальном перемещении груза на высоту $z_2 - z_1$ одинаково и равно изменению возвышения центра тяжести судна над килем:

$$\partial h = \partial H = -\frac{P}{D}(z_2 - z_1). \tag{92}$$

Исправленная поперечная метацентрическая высота

$$h_1 = h + \partial h,$$

исправленная продольная метацентрическая высота

$$H_1 = H + \partial H.$$

Так как величина δH обычно весьма мала по сравнению с продольной метацентрической высотой, то в расчетах можно пренебрегать поправкой δH и принимать

$$H_1 \approx H.$$

Угол крена от переноса груза поперек корабля на расстояние $y_2 - y_1$ равен:

$$\theta = \frac{P(y_2 - y_1)}{D(h + \delta h)}. \quad (93)$$

Угол дифферента от переноса груза вдоль корабля на расстояние $x_2 - x_1$ равен:

$$\psi = \frac{P(x_2 - x_1)}{DH}. \quad (94)$$

Изменение осадки носом и кормой

$$\delta T_н = \frac{P(x_2 - x_1)}{DH}\left(\frac{L}{2} - x_f\right), \quad (95)$$

$$\delta T_к = -\frac{P(x_2 - x_1)}{DH}\left(\frac{L}{2} + x_f\right). \quad (96)$$

Формулы (93) — (96) являются приближенными, поскольку они основываются на применении метацентрической формулы остойчивости.

§ 26. ВЛИЯНИЕ ПРИЕМА ИЛИ СНЯТИЯ МАЛОГО ГРУЗА НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И ПОСАДКУ КОРАБЛЯ

Пусть координаты центра тяжести принятого или снимаемого груза будут x, y, z. Вес груза обозначен через P.

Все приводимые ниже формулы являются приближенными и применимы при весе груза, не превосходящем 10—15% от водоизмещения.

Изменение поперечной метацентрической высоты

$$\delta h = \pm \frac{P}{D \pm P}\left(T \pm \frac{\varepsilon}{2} + \varkappa - h - z\right), \quad (97)$$

где $\varepsilon = \frac{P}{\gamma S}$ — изменение средней осадки;

$\varkappa$ — радиус кривизны катящейся кривой (см. § 24). Обычно величиной $\varkappa$ пренебрегают.

Верхние знаки принимаются в случае приема груза, а нижние — в случае снятия.

Изменение продольной метацентрической высоты

$$\delta H \approx \mp \frac{P}{D \pm P} H. \quad (98)$$

Угол крена от приема груза

$$\theta = \frac{Py}{(D \pm P)(h + \delta h)}. \quad (99)$$

Изменение угла дифферента от приема груза

$$\psi = \frac{P(x - x_f)}{DH}. \qquad (100)$$

Изменение осадки носом

$$\delta T_н = \pm \varepsilon + \psi\left(\frac{L}{2} - x_f\right). \qquad (101)$$

Изменение осадки кормой

$$\delta T_к = \pm \varepsilon - \psi\left(\frac{L}{2} + x_f\right). \qquad (102)$$

В случае приема или снятия большого груза формулы (97)—(99) оказываются недостаточно точными.

Для определения остойчивости в этом случае следует произвести расчет нового положения центра тяжести, а возвышение метацентра над килем определить по кривым элементов теоретического чертежа или по метацентрической диаграмме.

§ 27. ВЛИЯНИЕ ЖИДКОГО И ПОДВЕШЕННОГО ГРУЗА НА ОСТОЙЧИВОСТЬ КОРАБЛЯ

Присутствие на судне жидкого груза, имеющего свободную поверхность и потому способного перетекать при крене, вызывает уменьшение метацентрической высоты, рассчитанной без учета свободной поверхности на величину

$$\delta h = -\frac{\gamma_1 i_x}{\gamma V}, \qquad (103)$$

где γ_1 — вес единицы объема жидкого груза;
γ — вес единицы объема воды;
i_x — момент инерции площади свободной поверхности относительно оси, параллельной оси ox и проходящей через центр тяжести свободной поверхности.

Величина δh называется поправкой на свободную поверхность. Если жидким грузом является вода, то поправка на свободную поверхность

$$\delta h = -\frac{i_x}{V}. \qquad (104)$$

Если на судне имеется несколько отсеков, заполненных водой, имеющей свободную поверхность, величина поправки

$$\delta h = -\frac{\sum i_x}{V}, \qquad (105)$$

где i_x — момент инерции для каждой свободной поверхности принимается относительно оси, проходящей через ее ЦТ и параллельной оси ox.

Метацентрическая формула остойчивости в этом случае имеет вид

$$M = D\left(\frac{I_x - \sum i_x}{V} - a\right)\theta. \qquad (106)$$

В случае приема жидкого груза изменение метацентрической высоты

$$\delta h = \delta h_1 + \delta h_2,$$

где δh_1 вычисляется по формуле (97) так же, как для твердого груза, а δh_2 — по формулам (103) и (105) и учитывает влияние свободной поверхности.

При наличии на судне подвешенных грузов следует их центр тяжести считать в точке подвеса. Если при расчете остойчивости приняты были истинные положения центра тяжести подвешенных грузов, то следует ввести поправку к метацентрической высоте по формуле

$$\delta h = \frac{\sum p_i l_i}{D}, \qquad (107)$$

где p_i — вес груза, а l_i — возвышение точки подвеса над истинным положением центра тяжести груза.

Формулы (103)—(107) неприменимы, если переливание жидкости или перемещение подвешенного груза ограничено. В таких случаях влияние указанных грузов на остойчивость должно рассчитываться с учетом действительных перемещений центров тяжести их при рассматриваемом наклонении.

§ 28. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛЕНОСТИ ВОДЫ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ И ПОСАДКУ КОРАБЛЯ

Пусть объемный вес γ_1 окружающей судно воды вследствие изменения ее солености изменяется на величину

$$\delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1.$$

Средняя осадка судна изменится в этом случае на величину

$$z = -\chi_1 \frac{\delta\gamma}{\gamma_1} T = -\frac{V_1}{S_1}\frac{\delta\gamma}{\gamma_2}. \qquad (108)$$

Изменение поперечной метацентрической высоты составит

$$\delta h = -\frac{\delta\gamma}{\gamma_1}(T_1 + \varkappa_1 - z_{m_1}), \qquad (109)$$

где обозначено: $\chi_1 = \frac{\delta}{\alpha}$ — коэффициент вертикальной полноты корабля (§ 1), $\varkappa$ — радиус кривизны катящейся кривой (§ 24) и $z_{m_1} = z_c + r$ — возвышение поперечного метацентра над основной линией. Обычно величиной $\varkappa$ в формуле (109) при расчетах пренебрегают.

Изменение угла диферента равно:

$$\partial\psi = \frac{\partial\gamma}{\gamma_1} \cdot \frac{x_{f_1} - x_{c_1}}{H}. \tag{110}$$

Изменение осадки носом и кормой

$$\partial T_{н} = \varepsilon + \left(\frac{L}{2} - x_{f_1}\right)\partial\psi, \tag{111}$$

$$\partial T_{к} = \varepsilon - \left(\frac{L}{2} + x_{f_1}\right)\partial\psi. \tag{112}$$

В табл. 28 приводятся данные по объемному весу воды в разных морях.

Таблица 28

Объемный вес воды

Моря	Объемный вес, $m/м^3$	
	летом	зимой
Азовское	1,003	1,008
Балтийское	1,010	1,012
Баренцово	1,027	1,028
Белое	1,018	1,020
Берингово	1,023	—
Каспийское	1,005	1,010
Охотское	1,025	—
Северное	1,025—1,027	—
Средиземное	1,027	1,031
Черное	1,009—1,011	1,011—1,014
Японское	1,021	1,028

§ 29. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ КОРАБЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛНОТЫ ЕГО НА НАЧАЛЬНУЮ ОСТОЙЧИВОСТЬ

При небольших изменениях главных размерений корабля L, B, H изменение метацентрической высоты Δh может быть выражено в виде полного диференциала:

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial L}\Delta L + \frac{\partial h}{\partial B}\Delta B + \frac{\partial h}{\partial H}\Delta H, \tag{113}$$

где величины частных производных определяются по формулам Семенова Тян-Шанского, выведенным в предположении, что с изменением высоты борта H осадка T и возвышение ЦТ над основной z_g изменяются пропорционально изменению H и что водоизменение

корабля изменяется пропорционально изменению главных размерений:

$$\frac{\partial h}{\partial L} = 0; \quad \frac{\partial h}{\partial B} = 2\frac{h+a}{B}; \quad \frac{\partial h}{\partial H} = -\frac{h+2a}{H}, \tag{114}$$

где $a = z_c - z_g$.

Объемное водоизмещение, к которому относится поправка, определяемая формулой (113), равно:

$$V_1 = V_0\left(1+\frac{\Delta L}{L}\right)\left(1+\frac{\Delta B}{B}\right)\left(1+\frac{\Delta H}{H}\right), \tag{115}$$

где через V_0 обозначено первоначальное водоизмещение корабля. Если действительное объемное водоизмещение V не равно V_1 и возвышение центра тяжести изменяется согласно зависимости

$$\Delta z_g = k\Delta H, \tag{116}$$

то выражение Δh определяется формулой

$$\Delta h = 2\frac{h+a}{B}\Delta B - \frac{h+2a}{H}\Delta H +$$

$$+ \frac{\Delta V}{V}(T - z_g - h) - \Delta H\left(\frac{z_g}{H} - k\right), \tag{117}$$

где

$$\Delta V = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right)V_0 - \frac{\Delta D}{\gamma}; \tag{118}$$

здесь через ΔD обозначено фактическое приращение весового водоизмещения корабля по расчетам нагрузки

$$\Delta D = D - D_0. \tag{119}$$

При ориентировочных подсчетах величина ΔD может быть принята равной

$$\Delta D = P_к\left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right), \tag{120}$$

где $P_к$ — вес корпуса корабля.

При изменении коэффициентов полноты δ и α изменение метацентрической высоты определяется по формуле Семенова Тян-Шанского

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial \delta}\Delta\delta + \frac{\partial h}{\partial \alpha}\Delta\alpha, \tag{121}$$

где

$$\frac{\partial h}{\partial \delta} = -\frac{1}{\delta}\left[h + a + \frac{\alpha\delta}{(\alpha+\delta)^2}T\right], \tag{122}$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{1}{\alpha}\left[2(h+a) + \frac{\alpha\delta}{(\alpha+\delta)^2}T\right]. \tag{123}$$

Формулы (122) и (123) получены в предположении, что изменение коэффициентов полноты не влияет на возвышение z_g центра тяжести над основной.

§ 30. ОПЫТ КРЕНОВАНИЯ

Опыт кренования производится в целях проверки расчетов нагрузки и остойчивости путем экспериментального определения водоизмещения корабля и положения его центра тяжести.

Определение положения центра тяжести корабля опытным путем производится на основании зависимости между величиной момента переносимого горизонтально поперек корабля груза и углом крена

$$\theta = \frac{Pl}{Dh}. \qquad (124)$$

Если известны вес груза P, плечо переноса l и крен θ, то метацентрическая высота может быть вычислена по формуле

$$h = \frac{Pl}{D\theta}. \qquad (125)$$

Возвышение центра тяжести судна над килем

$$z_g = z_c + r - h, \qquad (126)$$

где величины z_c и r определяются по кривым элементов теоретического чертежа или по метацентрической диаграмме, исходя из водоизмещения D.

Водоизмещение D с включением веса перемещаемого груза (называемого также кренбалластом) определяется по масштабу Бонжана на основании замера во время опыта осадок корабля носом и кормой по маркам углубления на штевнях и по надводному борту. При этом определяется и абсцисса центра величины x_c. Объемный вес морской воды γ рекомендуется определять с помощью ареометра.

Абсцисса центра тяжести судна

$$x_g = x_c - \psi(z_g - z_c). \qquad (127)$$

Измерение угла крена производится с помощью весков, число которых должно быть не менее трех. Для увеличения точности отсчета длина весков от точки подвеса до той грани рейки, по которой производятся измерения, должна быть возможно большей — на больших судах порядка 4—6 *м*. Для погашения колебаний веска к нему прикрепляется крылатка, опускаемая в бак с густым машинным маслом или мазутом. Угол крена находится по выражению

$$\theta = \frac{b}{\lambda}, \qquad (128)$$

где λ — длина веска, а b — перемещение веска по рейке. Наибольший крен судна во время опыта не должен превосходить 4°.

Требуемое количество перемещаемого груза для производства опыта определяется формулой

$$P = \frac{2Dh}{l}\theta, \qquad (129)$$

где величины D и h определяются по данным предшествовавших теоретических расчетов.

В качестве груза могут служить чугунные чушки, броневые плиты и др. Для производства опыта груз разбивается на четыре или шесть по возможности равных по весу групп, после чего каждая группа взвешивается на весах и маркируется. Все группы раскладываются на палубе в широкой части корабля в местах, допускающих удобный перенос груза, по две группы на каждом борту. При этом намечается и обводится мелом место для укладки переносимого груза, либо устраиваются специальные стеллажи и измеряются плечи переноса.

Таблица 29

Вычисление кренящего момента

Положение	Вес переносимого груза, P_i	Плечо переноса, l_i	Момент переноса, $P_i l_i$	Суммарный кренящий момент, M_i
0	0	0	0	0
1	P_1	$+l_1$	$+P_1l_1$	$+P_1l_1$
2	P_2	$+l_2$	$+P_2l_2$	$+P_1l_1+P_2l_2$
3	P_2	$-l_2$	$-P_2l_2$	$+P_1l_1$
4	P_1	$-l_1$	$-P_1l_1$	0
5	P_3	$-l_3$	$-P_3l_3$	$-P_3l_3$
6	P_4	$-l_4$	$-P_4l_4$	$-P_3l_3-P_4l_4$
7	P_4	$+l_4$	$+P_4l_4$	$-P_3l_3$
8	P_3	$+l_3$	$+P_3l_3$	0

Первый отсчет по вескам производится при равномерном расположении груза на обоих бортах, после чего груз переносится по одной группе сначала на один борт, потом на другой и, наконец, в исходное положение, и после каждого переноса производятся отсчеты по вескам. Полное число отсчетов по каждому веску получается при четырех группах груза равным девяти — соответственно числу положений груза.

Вычисление кренящего момента производится по табл. 29.

Запись отсчетов и обработка по каждому веску производятся по табл. 30. Здесь предусматривается, что вследствие незаметных на-глаз колебаний корабля весок во время отсчета не перестает качаться, и наблюдатель записывает положения веска при наибольших отклонениях его как в ту, так и в другую сторону.

Средние положения веска могут быть найдены путем обработки записанных данных по способу, аналогичному тому, который применяется при взвешивании на точных весах.

Средние значения углов крена по показаниям всех трех весков вычисляются в табл. 31 и 32.

Вычисление метацентрической высоты производится по способу наименьших квадратов согласно схеме, приведенной в табл. 33.

Таблица 30

Отсчеты по вескам

Номера отсчета	Показания весков: влево	Показания весков: вправо	Отсчет	Номера отсчета	Показания весков: влево	Показания весков: вправо	Отсчет
I	II	III		I	II	III	
	a'_1				a''_1		
1		a'_2		2		a''_2	
	a'_3				a''_3		
		a'_4				a''_4	
	a'_5				a''_5		
		a'_6	$a_1 =$			a''_6	$a_2 =$
	a'_7		$= \frac{1}{2}\left(\frac{1}{4}\sum_1^7 a'_i +\right.$		a''_7		$= \frac{1}{2}\left(\frac{1}{4}\sum_1^7 a''_i +\right.$
	$\sum_1^7 a'_i$	$\sum_2^6 a'_i$	$\left.+ \frac{1}{3}\sum_2^6 a'_i\right)$		$\sum_1^7 a''_i$	$\sum_2^6 a''_i$	$\left.+ \frac{1}{3}\sum_2^6 a''_i\right)$

Таблица 31

Углы крена по отдельному веску

Номера наблюдений	Весок № 1: Отсчеты по веску, α_i	Средний отсчет при прямом положении судна $\alpha_п = \frac{1}{3}(\alpha_0 + \alpha_4 + \alpha_8)$	Отклонение веска при крене, $\alpha_i - \alpha_п$	Угол крена, $\theta_i = \frac{\alpha_i - \alpha_п}{\lambda}$
0	α_0	$\alpha_п$	—	
1	α_1		$\alpha_1 - \alpha_п$	
2	α_2		$\alpha_2 - \alpha_п$	
3	α_3		$\alpha_3 - \alpha_п$	
4	α_4		—	
5	α_5		$\alpha_5 - \alpha_п$	
6	α_6		$\alpha_6 - \alpha_п$	
7	α_7		$\alpha_7 - \alpha_п$	
8	α_8		—	

Метацентрическая высота вычисляется по формуле

$$h = \frac{1}{D} \frac{\sum M_i \theta_i}{\sum \theta_i^2} = \frac{1}{D} \frac{\sum_1}{\sum_2}. \qquad (130)$$

Вероятная абсолютная погрешность метацентрической высоты, вычисленной на основании произведенных наблюдений

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_3}{30}}. \qquad (131)$$

Полная относительная погрешность определения метацентрической высоты

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\varepsilon}{h} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h_1}{h}, \qquad (132)$$

где $\frac{\Delta D}{D}$ — погрешность определения водоизмещения, достигающая 1,0—1,5%, и $\frac{\Delta h_1}{h}$ — погрешность от неточности метацентрической формулы, достигающая 1,0%.

При обработке результатов опыта можно также применять несколько видоизмененную схему расчета, приняв за угол крена не отклонение корабля от прямого положения, как в описанной выше схеме, а изменение наклонения корабля при каждом перемещении груза. В этом случае в качестве кренящего момента принимается момент переноса $M_i = P_i l_i$, а схема для расчета углов крена приводится в табл. 34.

Таблица 32

Расчет средних углов крена

№ положений	Крен по показаниям весков			Средние значения крена, $\frac{1}{3}$ (II+III+IV)
	№ 1	№ 2	№ 3	
I	II	III	IV	V
1	θ_1'	θ_1''	θ_1'''	
2	θ_2'	θ_2''	θ_2'''	
3				
5				
6				
7				

Таблица 33

Определение метацентрической высоты в условиях опыта

Номера наблюдений	Кренящий момент, M_i	Угол крена, θ_i	Произведения II · III	Квадраты углов III²	Метацентрическая высота, $h_i = \frac{II}{D.III}$	Ошибка наблюдения, $\varepsilon_i = h - VI$	Квадраты ошибок, VII²
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	M_1	θ_1	$M_1\theta_1$	θ_1^2	h_1	ε_1	ε_1^2
2							
3							
5							
6							
7							
Сумма			$\sum_1$	$\sum_2$			$\sum_3$

Применение схемы расчета по табл. 34 дает некоторое преимущество, исключая систематическую погрешность, могущую иметь место в схеме табл. 31 при неточном отсчете для прямого положения.

В особых случаях кренование может производиться с помощью жидкого балласта, т. е. путем операций по перекачиванию принятой

Таблица 34

Расчет углов крена

Номера наблюдений	Весок №		$\lambda =$
	Отсчеты по веску, α_i	Отклонения веска	$\theta_i = \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{\lambda}$
0	α_0	—	—
1	α_1	$\alpha_1 - \alpha_0$	θ_1
2	α_2	$\alpha_2 - \alpha_1$	θ_2
3	α_3	$\alpha_3 - \alpha_2$	θ_3
4	α_4	$\alpha_4 - \alpha_3$	:
5	α_5	$\alpha_5 - \alpha_4$	
6	α_6	$\alpha_6 - \alpha_5$	
7	α_7	$\alpha_7 - \alpha_6$	
8	α_8	$\alpha_8 - \alpha_7$	

в бортовые систерны и отсеки воды. В случае кренования жидким кренбалластом самое тщательное внимание должно быть обращено на точное определение веса и положения центра тяжести принятого кренбалласта. Вес его может быть определен и путем вычисления, но при этом особое внимание должно быть обращено на правильное и достаточно точное определение объемов и центров тяжести объемов систерн и отсеков, используемых для кренбалласта. Достаточно точно должен быть учтен коэффициент заполнения этих систерн и отсеков. Уровни в них после каждой операции по перекачиванию должны тщательно замеряться. Влияние свободного уровня кренбалласта на остойчивость должно быть пренебрежимо малым. Должны быть учтены объемы воздушных подушек и центры тяжести этих объемов. Остатки кренбалласта, не поддающиеся перекачиванию, должны тщательно учитываться после каждой из операций по перекачиванию. Кренящий момент, создаваемый при каждой операции по перекачиванию, должен быть определен с ошибкой, не превосходящей $0{,}2\%$ от его величины. Соответствие систерн и отсеков, используемых для кренбалласта, их чертежам должно быть проверено на месте. Перемещение центра тяжести кренбалласта при каждой операции по его перекачиванию должно быть достаточно близким к поперечно-горизонтальному. Должны быть полностью исключены все возможности каких-либо изменений в количестве кренбалласта как во время нахождения его на корабле, так и во время операций по его перекачиванию. Наличие кренбалласта должно быть тщательно проверено перед самым началом кренования и непосредственно по его окончании. После окончания кренования кренбалласт должен занимать свое исходное положение.

По найденной метацентрической высоте h определяется по формуле (126) возвышение центра тяжести судна над килем при нагрузке, соответствующей условиям опыта. Для перехода к тому случаю нагрузки, который принимается за основной и по которому могут быть сосчитаны все другие, составляется ведомость излишних и недостающих грузов, с указанием координат их центра тяжести.

Для устранения случайных ошибок опыта должны быть соблюдены следующие требования:

1. Корабль должен иметь минимальное количество излишних и недостающих грузов.

2. Жидкие грузы должны быть по возможности все либо выкачаны (и соответствующие помещения осушены), либо тщательно запрессованы для уничтожения свободных поверхностей. Все подвижные грузы должны быть закреплены.

3. Корабль должен быть установлен в закрытом месте, защищенном от ветра, течения и волнения, и не должен касаться ни берега, ни грунта.

4. Швартовы должны быть заведены так, чтобы они не мешали судну крениться. Во время производства отсчетов по вескам швартовы должны потравливаться до полной слабины.

5. Никаких работ на судне во время опыта производиться не должно. Все люди, не принимающие участия в опыте, должны быть удалены с корабля. Механизмы не должны работать. Люди, участвующие в производстве опыта, должны находиться на своих местах. Хождение по судну должно быть запрещено.

6. Для паровых судов опыт производится с водой в котлах, так как это отвечает нормальным условиям их плавания.

Для производства опыта кренования необходимы следующее оборудование и чертежи:

1. Кренящий балласт.	В количестве, определяемом в соответствии с приведенными выше указаниями.
2. Вески.	
3. Деревянные рейки и доски.	
4. Ванночки для масла в целях гашения колебаний весков.	
5. Миллиметровая бумага.	Три полоски шириной 120—140 *мм*, длиной 500—600 *мм*.
6. Карандаши.	По две штуки каждому наблюдателю, заранее остро отточенные.
7. Канцелярские кнопки.	Для крепления миллиметровки.
8. Шлюпка или плотик.	Для замера осадок.
9. Футшток или рейка.	Для замера надводного борта.
10. Рулетка.	
11. Мел.	Для разметки места кренящего балласта на палубе.
12. Ареометр.	В случае кренования в морской воде.
13. Секундомеры.	Для замера периода качки.
14. Теоретический чертеж.	
15. Кривые элементов теоретического чертежа.	
16. Масштаб Бонжана.	
17. Спесификация.	
18. Чертежи общего расположения с экспликацией к ним.	
19. Ведомости снабжения.	
20. Расчет весовой нагрузки.	
21. Чертеж марок углубления.	

Для облегчения производства опыта полезно иметь заранее заготовленные бланки как для ведения протокола опыта, так и для относящихся к нему расчетов. Приводим формы таких бланков, разработанные инж. В. А. Уманцем.

ПРОТОКОЛ ПРОИЗВОДСТВА ОПЫТА КРЕНОВАНИЯ

1. Время производства опыта . . . .
   Начало . . . . Конец . . . .
2. Место производства опыта . . . .
   . . . .
3. Состояние погоды: Ветер . . . . баллов . . . .
   Поверхность воды . . . .
4. Опыт производил . . . .
   в присутствии . . . .
5. Удельный вес воды γ = ...
6. Особые замечания: . . . .
   . . . .
   . . . .
   . . . .
   . . . .

7. Осадка в момент опыта:

Во время опыта кренования были трижды замерены по маркам углублений с левого и правого бортов отдельно:

Осадка носом $T_н$ = ... *м.*

Осадка кормой $T_к$ = ... *м.*

Кроме того, для контроля осадок был замерен надводный борт до верхней кромки настила палубы:

В носу на $\Delta L_н$ = *мм* от носового перпендикуляра

$H'_н$ = *мм.*

В корме на $\Delta L_к$ = *мм* от кормового перпендикуляра [1)]

$H'_к$ = *мм.*

Высота борта от основной линии до точки замера определяется как сумма теоретической высоты борта в месте замера, снятой с теоретического чертежа, погиби бимса и толщины настила палубы.

Высота борта в носу на *мм* в от 0 шп.

теоретическая . . . . *мм*
погибь бимса . . . . *мм*
толщина настила палубы . . . . *мм*

Суммарная высота $H_н$ = *мм*

[1)] Величины $\Delta L_н$ и $\Delta L_к$ считаются положительными, если точки замера осадок в носу и в корме расположены в нос от соответствующего перпендикуляра.

Высота борта в корме на   *мм* в   от кормового перпендикуляра

теоретическая . . . . *мм*
погибь бимса . . . . *мм*
толщина настила палубы . . . . *мм*

Суммарная высота $H_к =$ *мм*

Осадка носом в месте замера $T'_н = H_н - H'_н =$ $=$

Осадка кормой в месте замера $T_к = H_к - H'_к =$ $=$

Осадка носом и кормой на перпендикулярах определяется следующим пересчетом.

Длина между точками замера

$$L' = L + \Delta L_н - \Delta L_к,$$

где $L =$ — длина между перпендикулярами.

Разность замеренных осадок $\Delta T' = T'_н - T'_к =$ $=$

Осадка носом на перпендикуляре

$$T_н = T'_н - \frac{\Delta T' \Delta L_н}{L'} =$$

Осадка кормой на перпендикуляре

$$T_к = T'_к - \frac{\Delta T' \Delta L_к}{L'} =$$

Таким образом, расхождение между величиной осадок по маркам углубления и по замерам надводного борта составляет:

в носу —   *м*,   в корме —   *м*.

При расчете водоизмещения в момент кренования принимаются осадки

носом $T_н =$ *м*.

кормой $T_к =$ *м*.

8. Балласт для кренования:

В качестве кренящего балласта были применены . . . . весом от . . . . до . . . . . *кг*, взвешенные перед опытом в присутствии представителей . . . . и замаркированные   были уложены на палубе в следующем порядке:

Левый борт	Правый борт
Группа № 1	Группа № 2
в районе . . . . шп.	в районе . . . . шп.
вес . . . . *кг*	вес . . . . *кг*
ЦТ над палубой . . . . *м*	ЦТ над палубой . . . . *м*
ЦТ от ДП . . . . *м*	ЦТ от ДП . . . . *м*

Группа № 3

в районе . . . . шп.
вес . . . . *кг*
ЦТ над палубой . . . . *м*
ЦТ от ДП . . . . *м*

Группа № 4

в районе . . . . шп.
вес . . . . *кг*
ЦТ над палубой . . . . *м*
ЦТ от ДП . . . . *м*

Общий вес балласта для кренования . . . . *кг*

9. Перенос кренящего балласта производился в порядке, указанном в следующей таблице:

№№ наклонения	Номера групп кренящего балласта	
	Левый борт	Правый борт
0	1, 3	2, 4
I	3	1, 2, 4
II	—	1, 2, 3, 4
III	3	1, 2, 4
IV	1, 3	2, 4
V	1, 2, 3	4
VI	1, 2, 3, 4	—
VII	1, 2, 3	4
VIII	1, 3	2, 4

Плечи переноса кренящего балласта:
Группа № 1 $l =$
Группа № 2 $l =$
Группа № 3 $l =$
Группа № 4 $l =$

10. Состояние нагрузки судна в момент производства опыта характеризуется прилагаемыми перечнями недостающих и излишних (по отношению к . . . . водоизмещению) грузов.

Недостающие грузы

№№ п. п.	Статьи нагрузки	Вес, *кг*	Плечи, *м*		Моменты, *кгм*	
			x	z	M_x	M_z
Всего недостающих грузов						

Излишние грузы

№№ п/п.	Статьи нагрузки	Вес, *кг*	Плечи, *м*		Моменты, *кгм*	
			x	z	M_x	M_z
1	Балласт для кренования					
2	Приспособления для кренования:					
	у веска № 1					
	у веска № 2					
	у веска № 3					
3	Наблюдатель у веска № 1					
4	Наблюдатель у веска № 2					
5	Наблюдатель у веска № 3					
6	Руководитель опыта					
7						
8						
9						
	Всего излишних грузов					

Наличие жидких грузов при опыте

№№ п/п.	Наименование отсеков и систерн	Количество жидкости	Вес, *кг*	Плечо от основной, *м*	Момент от основной, *кгм*	Наличие свободной поверхности
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
	Всего					

11. Расположение весков:

Вески для замера наклонений судна были расположены:

весок № 1

весок № 2

весок № 3

12. Показания весков

Весок № 1

Наблюдатель . . . . . . Длина веска λ = *мм*

Наименование		№ замеров								
		0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Отсчеты веска, *мм*	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
Среднее значение										
Разность средних значений										
Тангенс угла изменения крена										

Весок № 2

Наблюдатель Длина веска λ = *мм*

Наименование		№ замеров								
		0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Отсчеты веска, *мм*	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
	Прав.									
	Лев.									
Среднее значение										
Разность средних значений										
Тангенс угла изменения крена										

Весок № 3

Наблюдатель **Длина веска $\lambda =$** *мм*

Наименование		№ замеров								
		0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Отсчеты веска, *мм*	Прав. Лев. Прав. Лев. Прав. Лев. Прав. Лев. Прав. Лев.									
Среднее значение Разность средних значений Тангенс угла изменения крена										

13. Период качки судна:

При нагрузке судна в условиях опыта кренования по его окончании судно было подвергнуто раскачиванию с целью определения периода боковой качки судна. Тремя секундомерами было замерено время . . . . полных колебаний судна, оказавшееся равным . . . . . . сек. Таким образом, период качки

$$T = \frac{\qquad}{\qquad} = \quad \text{сек.}$$

Руководитель опыта:

РАСЧЕТ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ И КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТА КРЕНОВАНИЯ

Расчет произведен по данным протокола производства опыта кренования.

Объемное водоизмещение судна с учетом выступающих частей вычисляется по ватерлинию, определяемую параметрами:

$$T_н = \qquad м, \qquad T_к = \qquad м.$$

Водоизмещение судна и абсцисса ЦВ вычисляются по масштабу Бонжана (№). Для определения поперечного метацентрического радиуса вычисляется поперечный момент инерции площади действующей ватерлинии (с учетом диферента). Величина ординаты z_c центра величины вследствие малости влияния на нее диферента снимается непосредственно с кривых элементов теоретического чертежа (№).

Поперечный момент инерции площади ватерлинии

$$I_x = \frac{2}{3}\Delta L \sum y^3 =$$

Таблица I

Определение объема и координат ЦТ выступающих частей

№№ п/п.	Наименование элементов	Объем, $м^3$	Плечи, $м$		Моменты, $м^4$	
			x	z	M_x	M_z
1	Гребные винты					
2	Кронштейны					
3	Гребные валы					
4	Руль					
5						
6						
	Для суммы	$v =$	$x =$	$z =$		

Поправка на момент инерции площади свободной поверхности жидкого топлива

$$\Delta I_x = \frac{\gamma_т}{\gamma} i,$$

где $\gamma_т = \frac{m}{м^3}$ — объемный вес топлива;

$\gamma = \frac{m}{м^3}$ — объемный вес забортной воды (см. протокол кренования №).

$i = м^4$ — момент инерции площади свободной поверхности топлива (см. там же)

$$\Delta I_x =$$

Поперечный метацентрический радиус в условиях опыта

$$r = \frac{I_x - \Delta I_x}{V} =$$

Весовое водоизмещение в условиях опыта

$$D = \gamma V =$$

Таблица II

Определение водоизмещения, координат ЦВ и метацентрического радиуса в условиях опыта

Номера шп.	Множители, n	Площади шпанг., ω	Произведения, $n\omega$	Ординаты ВЛ, y	Кубы ординат, y^3
0	10				
1	9				
2	8				
3	7				
4	6				
5	5				
6	4				
7	3				
8	2				
9	1				
10	0				
11	1				
12	2				
13	3				
14	4				
15	5				
16	6				
17	7				
18	8				
19	9				
20	10				
Суммы					
Поправки					
Суммы исправленные	$\sum\omega$		$\sum n\omega$		$\sum y^3$

$\Delta L =$ м

Объемное водоизмещение без выступающих частей

$$V' = \Delta L \sum \omega =$$

Абсцисса ЦВ объема V'

$$x'_c = \Delta L \frac{\sum n\omega}{\sum \omega} =$$

$z'_c =$ м

(по кривым)

Водоизмещение с учетом выступающих частей

$$V = V' + v =$$

Абсцисса ЦВ

$$x_c = \frac{V' x'_c + vx}{V} =$$

Ордината ЦВ

$$z_c = \frac{V' z'_c + vz}{V} =$$

Таблица III

Вычисление средних расчетных тангенсов углов изменения крена

№№ весков	Тангенсы углов изменения крена при замерах №№							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1 2 3								
Сумма								
Среднее значение								

Значения тангенсов углов крена взяты из протокола опыта кренования № ..

Таблица IV

Определение кренящих моментов при переносе кренящего балласта

Наименование	№№ замеров							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Направление переноса груза Вес груза P, *т* Плечо переноса l, *м* Кренящий момент M, *тм*	Вправо	Вправо	Влево	Влево	Влево	Влево	Вправо	Вправо

Таблица V

Вычисление моментов инерции свободных поверхностей жидкости, находящейся на судне во время опыта[1]

№№ п п.	Наименование систерн	Положение отсека	Ширина свободных поверхностей	Длина свободных поверхностей	$i = \frac{lb^3}{12}$	γ	$i\gamma$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
$\Delta h = \frac{\Sigma i\gamma}{D} =$							

[1] За исключением жидкого топлива, учтенного ранее.

Определение метацентрической высоты и ординаты ЦТ судна в условиях опыта и вычисление случайных погрешностей по способу наименьших квадратов

№№ замеров	$M = pl$	$\operatorname{tg}\theta \cdot 10^2$	$M \operatorname{tg}\theta \cdot 10^2$	$\operatorname{tg}^2\theta \cdot 10^4$	$h_i = \frac{1}{D}\frac{M}{\operatorname{tg}\theta}$	$\varepsilon_i = h_0 - h_i$	$\varepsilon_i^2 \cdot 10^4$
	тм	—	*тм*	—	*м*	*м*	*м²*
I							
II							
III							
IV							
V							
VI							
VII							
VIII							
			$\Sigma_1 =$	$\Sigma_2 =$			$\Sigma_3 =$

Наименование величин	Формулы	Численные значения
Метацентрическая высота в условиях опыта	$h_1 = \frac{10^2}{D}\frac{\Sigma_1}{\Sigma_2}$	
Поправка на свободную поверхность	Δh	
Исправленная метацентрическая высота в условиях опыта	$h_0 = h_1 + \Delta h$	
Возвышение метацентра над основной линией	$z_m = z_c + r$	
Возвышение ЦТ судна над основной в условиях опыта	$z_g = z_m - h_0$	
Вероятная погрешность каждого опыта	$\varepsilon' = 0{,}01\sqrt{\frac{\Sigma_3}{n-1}}$	
Общая вероятная ошибка	$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\sqrt{n}}$	

Таблица VII

Подсчет общей погрешности определения метацентрической высоты и ординаты ЦТ судна в условиях опыта

Наименование величин	Формулы	Численные значения
Относительная погрешность от случайных ошибок	$\frac{\varepsilon}{h_0}$	
Относительная погрешность от неточности определения водоизмещения	$\frac{\Delta D}{D} \cong \frac{0{,}02D}{D}$	0,0200
Относительная погрешность от неточности определения веса кренящего балласта	$\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{0{,}01P}{P}$	0,0100
Относительная погрешность от неточности метацентрической формулы	$\frac{\Delta h_0}{h_0} = \frac{1}{n}\frac{r}{2h_0}\frac{\Sigma_2}{10^4}$	
Общая относительная погрешность	$\Delta h' = \frac{\varepsilon}{h_0} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta h_0}{h_0}$	
Общая абсолютная погрешность	$\Delta h = \Delta h' h_0$	

Таблица VIII

Водоизмещение и координаты ЦТ судна при различных случаях нагрузки по проектному расчету весовой нагрузки (   ) и по результатам кренования

Наименование		Вес, m	Плечи, $м$		Моменты, $тм$	
			x	z	M_x	M_z
Судно в момент кренования						
Излишние грузы						
Недостающие грузы						
Водоизмещение						
Водоизмещение по расчету весовой нагрузки						
Поправка						
Водоизмещение	По расчету нагрузки					
	По кренованию					
Водоизмещение	По расчету нагрузки					
	По кренованию					
Водоизмещение	По расчету нагрузки					
	По кренованию					

По результатам опыта раскачивания судна определяется величина коэффициента C формулы:

$$h = \frac{C^2 B^2}{T^2}$$

где $B =$ $м$ — ширина судна;

$h =$ $м$ — поперечная метацентрическая высота судна в условиях опыта;

$T =$ сек. — период бортовой качки (см. протокол опыта кренования №).

Искомый коэффициент

$$C = \frac{T}{B}\sqrt{h} = \text{———} = \quad \text{сек.}\ м^{\frac{1}{2}}.$$

При изменении нагрузки судна значение этого коэффициента обычно мало меняется, и потому можно считать, что при изменившейся нагрузке судна поперечная метацентрическая высота его выражается приближенной зависимостью

$$h \cong \frac{C^2 B^2}{T^2} = \frac{\quad}{T^2} = \frac{\quad}{T^2},$$

где T — период боковой качки судна при изменившейся нагрузке.

§ 31. НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИХ ФОРМУЛ

Посадка корабля на камень. Применяя формулы начальной остойчивости, можно по изменению посадки корабля приближенно установить, какой частью днища судно сидит на камне, если только оно не получило значительного диферента и если в днище не оказалось пробоины.

Пусть нос корабля при посадке его на камень поднялся на n $м$, корма на k $м$, а левый (или правый) борт у миделя на p $м$. Тогда сила Q, с которой корабль давит на камень, равна

$$Q = \gamma S \frac{n+k}{2}, \tag{133}$$

где γ — объемный вес воды;

S — площадь ГВЛ.

Координаты точки днища, которой корабль сидит на камне, будут:

$$x = x_f + (R - a)\frac{2D}{\gamma S(n+k)}\frac{n-k}{L}, \tag{134}$$

$$y = (r - a)\frac{2D}{\gamma S(n+k)}\frac{2p-(n+k)}{B} \tag{135}$$

или, выражая координаты через углы дифферента ψ и крена θ,

$$x = x_f + (R - a)\frac{D}{Q}\psi, \tag{136}$$

$$y = (r - a)\frac{D}{Q}\theta, \tag{137}$$

где

$$\psi = \frac{n - k}{L} \quad \text{и} \quad \theta = \frac{p - \frac{n + k}{2}}{\frac{1}{2}B}. \tag{138}$$

Остойчивость корабля при посадке на мель с малым диферентом. Если давление на киль $Q = \gamma\varepsilon S$, изменение метацентрической высоты для прямостенных судов равно

$$\Delta h = -\frac{Q}{D}\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right). \tag{139}$$

Величина восстанавливающего момента при наклонении на угол θ,

$$M = D\left[h - \frac{Q}{D}\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right)\right]\theta, \tag{140}$$

где $\varepsilon < 0$.

Остойчивость корабля при вводе в док. Давление на кормовой блок. Если корабль до ввода в док имеет дифферент на корму $\psi = \frac{T_к - T_н}{L}$, а уклон линии кильблоков равен α, причем $\psi > \alpha$, то наибольшее давление на кормовой блок равно

$$Q \cong 2D\frac{R - a}{L}(\psi - \alpha). \tag{141}$$

Изменение остойчивости при этом равно

$$\delta h \cong -\frac{Q}{D}\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right). \tag{142}$$

Величина восстанавливающего момента при малом крене θ:

$$M = D\left[h - \frac{Q}{D}\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right)\right]\theta, \tag{143}$$

где $\varepsilon < 0$.

Пловучий кран. Уравнение равновесия крана, плавающего до приема груза по ватерлинию W_0L_0 (рис. 31), взявшего груз p и наклонившегося на угол ψ, имеет вид:

$$p(b + c\operatorname{ctg}\psi) \cong DH; \tag{144}$$

значения букв b и c показаны на рис. 31, а H — метацентрическая высота:

$$H = R - a = z_c + R - z_g;$$

D — водоизмещение крана с учетом принятого груза

$$D = D_0 + p.$$

Увеличение осадки крана от приема груза

$$\varepsilon = \frac{p}{q},$$

где q — число тонн на 1 *м* углубления.

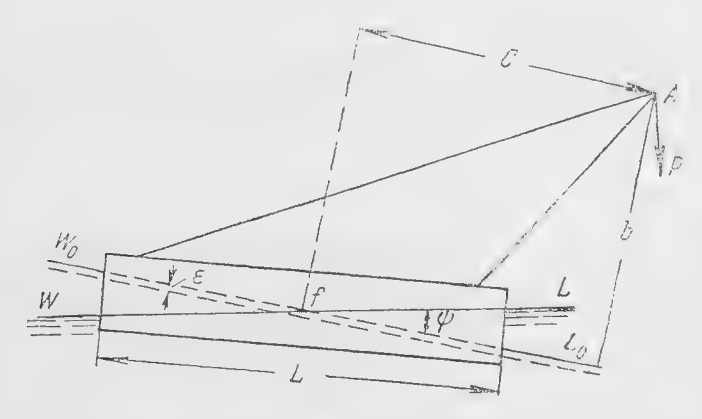


Рис. 31.

Угол диферента, при котором кромка палубы входит в воду,

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{F - \varepsilon}{\frac{L}{2}},$$

где F — высота надводного борта.

Максимальный груз, поднимаемый краном водоизмещения D, определяется из уравнения:

$$p_{max}\left(b + c\,\frac{\frac{1}{2}L}{F - \frac{p_{max}}{q}}\right) \cong (D_0 + p_{max})\,H. \qquad (145)$$

§ 32. НАЧАЛЬНАЯ ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Остойчивость в подводном положении. Остойчивость подводной лодки в подводном положении определяется высотой расположения центра величины над центром тяжести. Действительно, метацентрическая высота вообще равна

$$h = z_c + r - z_g.$$

Но для вполне погруженных тел $r = 0$, следовательно,

$$h = z_c - z_g. \qquad (146)$$

Для остойчивости подводной лодки необходимо, чтобы было $h > 0$ и, следовательно, $z_c > z_g$.

Продольная остойчивость погруженной подводной лодки равна поперечной, если не считать небольшой разницы в малых величинах поправок на влияние свободной поверхности.

Остойчивость в надводном положении. Начальная остойчивость в надводном положении определяется формулой

$$h = z_c + r - z_g. \qquad (147)$$

Входящие сюда величины могут быть определены для любого надводного положения по методу переменного водоизмещения. z_c — возвышение ЦВ над основной определяется по диаграмме для водоизмещения

$$V = V_0 + \frac{q}{\gamma},$$

где V_0 — крейсерское водоизмещение подводной лодки;

q — вес принятого балласта.

Возвышение ЦТ над основной z_g определяется с учетом воды в систернах главного балласта по формуле

$$z_g = \frac{D_0 z_{g_0} + q z_q}{D_0 + q}. \qquad (148)$$

Малый метацентрический радиус

$$r = \frac{I_x}{V_0 + \frac{1}{\gamma} q}. \qquad (149)$$

При вычислении r следует учитывать также поправки на влияние свободной поверхности воды в систернах

$$\Delta r = \frac{\sum i_x}{V_0 + \frac{q}{\gamma}}. \qquad (150)$$

На рис. 32 показана диаграмма начальной остойчивости подводной лодки, принцип построения которой аналогичен метацентрической диаграмме надводных судов.

Остойчивость подводной лодки при погружении и всплытии. При рассмотрении остойчивости подводной лодки во время погружения и всплытия необходимо учитывать влияние свободной поверхности воды в систернах главного балласта.

Здесь возможны три основных случая:

1. Кингстоны закрыты и систерны обоих бортов разобщены полностью (рис. 33).

В этом случае поправка на свободную поверхность для одной пары систерн равна

$$\Delta r_1 = \frac{2i_1}{V}, \tag{151}$$

где i_1 — момент инерции свободной поверхности воды в систерне одного борта относительно собственного центра тяжести ее

$$i_1 = \frac{1}{12} \int_l (y_{н} - y_{п})^3 \, dx. \tag{152}$$

2. Кингстоны открыты и трубопровод вентиляции сообщает систерны обоих бортов (рис. 34). Поправка на свободную поверхность равна

$$\Delta r_2 = \frac{2i_2}{V}, \tag{152a}$$

где i_2 — момент инерции площади свободной поверхности воды в систерне, взятый относительно диаметральной плоскости

$$i_2 = \frac{1}{3} \int_l (y_{н}^3 - y_{п}^3) \, dx. \tag{153}$$

3. Кингстоны открыты, клапаны вентиляции закрыты и разобщают систерны обоих бортов (рис. 35).

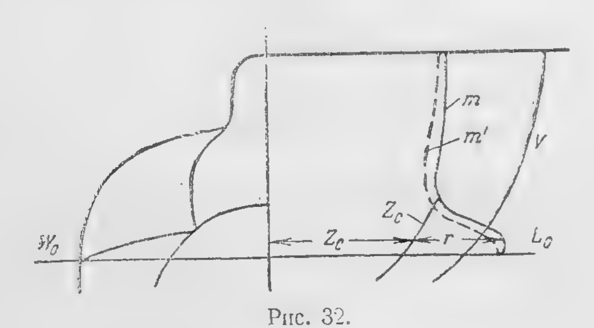


Рис. 32.

Поправка главного балласта в этом случае определяется формулами:

$$\Delta r_3 = \frac{2i_3}{V}, \tag{154}$$

где

$$i_3 = (1 - \alpha)\, i_1 + \alpha i_2, \tag{155}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{10S}{W}}, \tag{156}$$

здесь W — свободный от воды объем систерн при отсутствии крена,
S — соответетвующая ему площадь свободного уровня воды в систернах.

Для прямостенных систерн

$$\alpha \simeq \frac{H}{H+10}, \tag{157}$$

где H — высота свободной от воды части систерн.

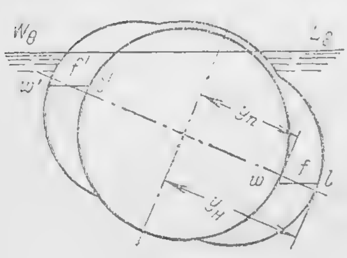


Рис. 33.

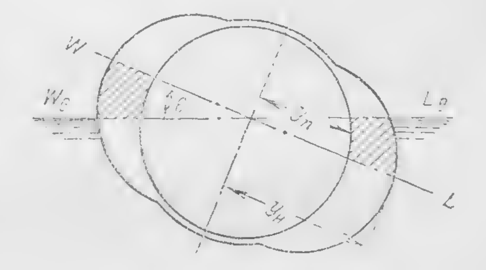


Рис. 34.

Указанные поправки вводятся следующим образом.

При медленно происходящем процессе всплытия поправки на положение метацентра равны

$$\Delta r_в = \frac{2}{V}\left(\sum_1 i_2 + \sum_2 i_3\right), \tag{158}$$

где $\sum_1$ распределяется на все систерны с общей вентиляцией, а $\sum_2$ — на все систерны с раздельной вентиляцией.

При быстро происходящем процессе погружения поправка равна

$$\Delta r_п = \frac{2}{V}\sum_3 i_1, \tag{159}$$

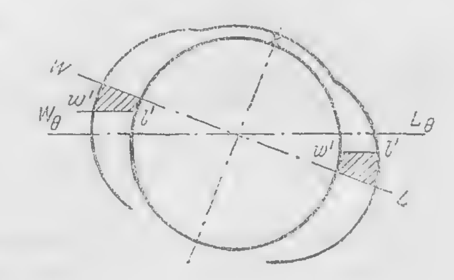


Рис. 35.

где $\sum_3$ распределяется на все систерны независимо от рода их вентиляции. Вообще же при погружении клапаны вентиляции и кингстоны открыты и потому, если предположить, что вода имеет достаточно времени для перетекания из одной систерны в другую, поправка на свободную поверхность должна быть вычислена по формуле:

$$\Delta r_п = \frac{2\sum i_2}{V}, \tag{160}$$

где величины i_2 вычисляются по формуле (153) и $\sum i_2$ распространяется на все систерны. Поправка $\Delta r_д$ может быть настолько значительной, что метацентрическая высота может стать отрицательной. Метацентрическая высота, определяемая с поправкой $\Delta r_д$, характеризует действительную остойчивость лодки. Однако углы крена, которые лодка может получить при погружении под действием внешних моментов, будут определяться метацентрической высотой, которая получится, если вычислять поправку к метацентрическому радиусу по формуле (159). Эта метацентрическая высота будет характеризовать кажущуюся остойчивость.

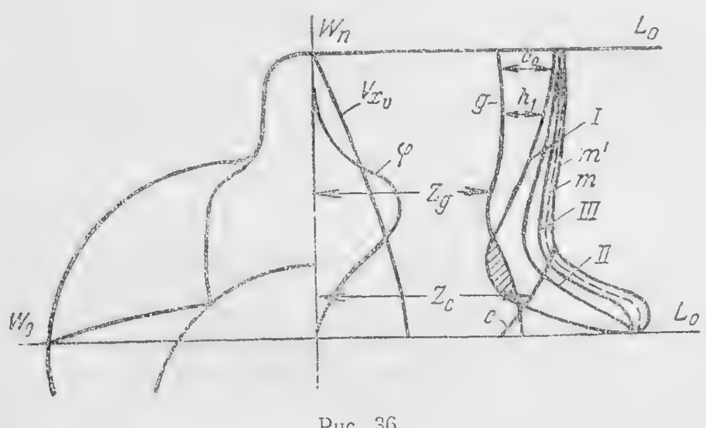


Рис. 36.

Возвышение центра тяжести подводной лодки при погружении или всплытии определяется формулой

$$z_g = \frac{D_0 z_{g_0} + \sum qz}{D_0 + \sum q}. \tag{161}$$

Объем V в выражении для поправок кажущейся и действительной остойчивости в любой момент всплытия или погружения равен

$$V = V_0 + \frac{q}{\gamma}. \tag{162}$$

Угол диферента равен

$$\operatorname{tg} \psi \cong \frac{v x_v - \sum W x_w}{I_y}, \tag{163}$$

где v — выходящий из воды водонепроницаемый объем, W — свободные от воды объемы систерн главного балласта, x_w — абсцисса их центра тяжести.

Для вычисления величин W, x_w, q, z и i необходимо произвести расчет элементов пловучести и начальной остойчивости балластных систерн при разных количествах балласта в них. По данным

расчетов строится диаграмма всплытия и погружения (рис. 36). На этом рисунке: *I* — кривая МТЦ с поправками действительной остойчивости при всплытии и погружении; *II* — кривая МТЦ с поправками кажущейся остойчивости при всплытии; *III* — кривая МТЦ с поправками кажущейся остойчивости при погружении.

Поправки на влияние свободной поверхности жидких грузов в систернах, расположенных внутри прочного корпуса, определяются аналогично поправкам для систерн главного балласта по формулам (151 — 158) в зависимости от устройства внутренних систерн. Для топливных систерн, в которых часть топлива замещена водой, поправки определяются по формуле:

$$\Delta r = \frac{(\gamma - \gamma_1)\, i_x}{\gamma V}, \qquad (164)$$

где γ_1 — объемный вес топлива;

γ — объемный вес воды;

i_x — момент инерции поверхности раздела жидкостей. Суммарная величина поправок на влияние свободных поверхностей жидких грузов внутри прочного корпуса не должна превышать 2 — 3 *см*.

Значения начальной метацентрической высоты для некоторых подводных лодок приведены в табл. 35, составленной по материалам К. Ф. Игнатьева (см. его книгу „Теория подводных лодок", Воениздат, 1947).

Таблица 35

Значения метацентрической высоты

№№ п/п.	Тип лодки	Надводное водоизмещение, *т*	Метацентрическая высота, *м*
1	Двухкорпусная	117	0,47
2	„	260	0,59
3	„	1156	0,44
4	Полуторакорпусная	312	0,63
5	„	355	0,27
6	„	450	0,31
7	„	516	0,55
8	„	690	0,45
9	„	954	0,34
10	Однокорпусная	650	0,38

ГЛАВА III

ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВ ПРИ БОЛЬШИХ НАКЛОНЕНИЯХ

§ 33. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЩИЕ ФОРМУЛЫ

При больших углах крена, обычно превышающих 10°, 20°, а иногда и 25°, нарушается линейная зависимость между восстанавливающим моментом и углами крена. Статическая остойчивость при этих углах характеризуется диаграммой статической остойчивости, на которой графически представлена зависимость восстанавливающих моментов

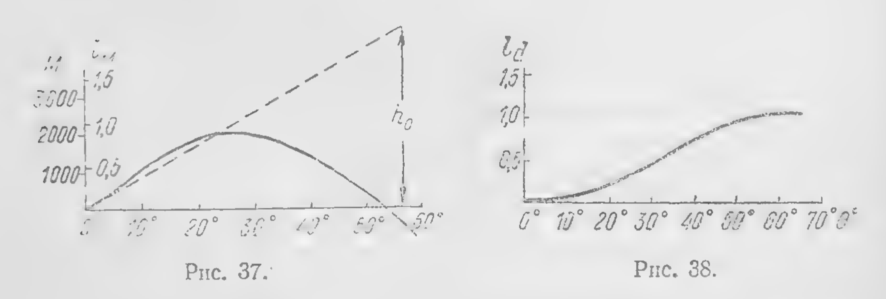


Рис. 37.

Рис. 38.

от углов крена (рис. 37). По оси абсцисс откладываются углы крена, а по оси ординат — соответствующие им величины восстанавливающих моментов, или их плеч.

Динамическая остойчивость судов на больших углах крена характеризуется диаграммой динамической остойчивости. По оси абсцисс этой диаграммы (рис. 38) откладываются значения углов крена, а по оси ординат — соответствующие им величины плеч динамической остойчивости l_d. Последние представляют собой увеличение при крене судна вертикальных расстояний между центром тяжести и центром величины. Произведения плеч динамической остойчивости на водоизмещение дают величину наименьшей работы, которую нужно затратить для того, чтобы накренить судно на угол θ.

При крене судна центр величины его перемещается в сторону наклонения. Пусть начало координат совпадает с ЦВ в прямом положении, ось y направлена в сторону наклонения, а ось z — вертикально

вверх. Координаты ЦВ при крене определятся в этих осях выражениями (рис. 39)

$$
\left.
\begin{aligned}
y &= \int_0^\theta r_\varphi \cos\varphi \, d\varphi \\
z &= \int_0^\theta r_\varphi \sin\varphi \, d\varphi
\end{aligned}
\right\} \quad (165)
$$

где r_φ — метацентрический радиус судна, накрененного на угол φ, равный

$$r_\varphi = \frac{I_\varphi}{V}; \quad (166)$$

здесь I_φ — момент инерции площади наклонной ватерлинии относительно ее центральной продольной оси.

Плечи статической остойчивости определяются общей формулой

$$l_\theta = y\cos\theta + z\sin\theta - a\sin\theta, \quad (167)$$

где a — возвышение центра тяжести над центром величины в ненакрененном положении.

На рис. 39 плечо остойчивости равно отрезку $\overline{GK}$.

Величина

$$l_\theta = y\cos\theta + z\sin\theta \quad (168)$$

зависит только от формы обводов судна и называется плечом остойчивости формы. На рис. 39 оно равно отрезку $\overline{C_0L}$. Очевидно, что плечо статической остойчивости равно:

$$l_\theta = l_ф - a\sin\theta, \quad (169)$$

где $l_ф$ — плечо остойчивости формы, а $\sin\theta$ — плечо остойчивости веса.

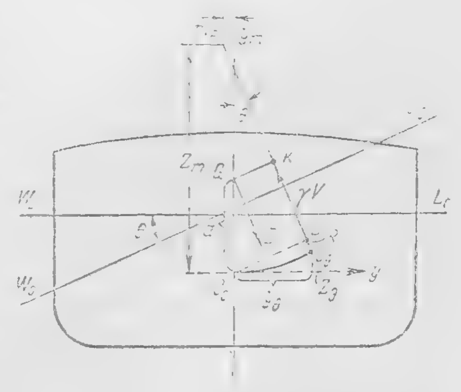


Рис. 39.

Координаты метацентра m_θ при крене θ, представляющего собой центр кривизны кривой центров величины в точке C_θ, выражаются формулой

$$
\left.
\begin{aligned}
y_m &= y - r_\theta \sin\theta \\
z_m &= z + r_\theta \cos\theta
\end{aligned}
\right\} \quad (170)
$$

Производная от плеча статической остойчивости по крену θ равна отрезку, определяемому зависимостью:

$$\frac{dl}{d\theta} = r_\theta - y\sin\theta + z\cos\theta - a\cos\theta. \quad (171)$$

Геометрически эта производная равна возвышению метацентра m_θ при крене θ над проекцией центра тяжести G судна на направление силы поддержания и называется обобщенной метацентрической высотой. На рис. 39 она равна отрезку $m_\theta K$. Очевидно, что значение производной от l_θ в начале координат равно

$$\left| \frac{dl_\theta}{d\theta} \right|_{\theta=0} = r - a = h. \tag{172}$$

Производная от плеча остойчивости формы по водоизмещению определяется выражением

$$\frac{dl_ф}{dV} = \frac{1}{V} (l_f - l_ф). \tag{173}$$

Входящие сюда величины изображены на рис. 40, причем отрезок l_f называется плечом катящейся кривой и равен расстоянию fp между центром тяжести f площади наклонной равнообъемной ватерлинии $W_\theta L_\theta$ и проекцией p точки пересечения исходной ватерлинии с диаметральной плоскостью на наклонную ватерлинию. Отрезку l_f приписывается знак плюс, если точка f располагается от точки p в сторону наклонения и, следовательно, на рис. 40 $l_f > 0$.

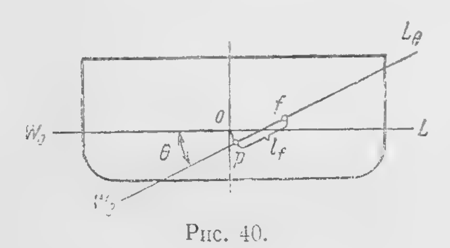


Рис. 40.

Плечо динамической остойчивости определяется общим выражением

$$l_d = \int_0^\theta l_\theta d\theta = y \sin \theta - z \cos \theta - a (1 - \cos \theta). \tag{174}$$

Геометрически плечо динамической остойчивости равно приращению вертикального расстояния между центром тяжести и центром величины. На рис. 39 оно равно отрезку $\overline{C_\theta R}$

$$\overline{C_\theta R} = \overline{KC_\theta} - \overline{GC_0}.$$

Из формулы (174) следует, что кривая динамической остойчивости является интегральной кривой по отношению к диаграмме статической остойчивости.

Из приводимых здесь общих зависимостей вытекают следующие геометрические свойства диаграммы статической и динамической остойчивости, могущие служить для контроля правильности вычислений:

1. Диаграмма статической остойчивости является нечетной функцией от угла θ, а диаграмма динамической остойчивости — четной.

2. Если при значении $\theta = 1$ радиану восстановить ординату, равную начальной метацентрической высоте, и конец ее соединить пря-

мой с началом координат, то полученная наклонная прямая должна быть касательной к диаграмме статической остойчивости в начале координат.

3. Диаграмма динамической остойчивости должна касаться оси абсцисс в начале координат, иметь точку перегиба при угле крена, соответствующем максимуму диаграммы статической остойчивости, и иметь максимум при крене, отвечающем полной потере остойчивости (где диаграмма статической остойчивости пересекает ось абсцисс).

§ 34. РАСЧЕТ ОСТОЙЧИВОСТИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА ПО МЕТОДАМ акад. А. Н. КРЫЛОВА

Общий порядок расчета остойчивости на больших углах крена по методам акад. А. Н. Крылова сводится к следующему.

1. На чертеже корпуса проводится ряд равнообъемных ватерлиний при значениях угла крена 0°, 10°, 20°, 30° и т. д.[1])

2. Вычисляются моменты инерции I_φ площадей ватерлиний относительно продольной оси, проходящей через их центры тяжести.

3. Вычисляются метацентрические радиусы для каждого наклонения r_0, r_{10}, r_{20} и т. д. по формуле

$$r_\varphi = \frac{I_\varphi}{V}.$$

4. Пользуясь правилом трапеций, вычисляют значения координат центра величины по формулам (165):

$$y = \int_0^\theta r_\varphi \cos\varphi \, d\varphi; \qquad z = \int_0^\theta r_\varphi \sin\varphi \, d\varphi.$$

5. Определяют плечи остойчивости формы $l_ф$ или ординаты диаграммы статической остойчивости по формулам (168) и (169):

$$l_ф = y\cos\theta + z\sin\theta,$$

$$l = l_ф - a\sin\theta.$$

6. Операции 4 и 5 могут быть заменены графическим построением полярной диаграммы остойчивости, описание которой дается ниже.

Для выполнения расчетов остойчивости на больших углах крена может служить чертеж корпуса с нанесенными на нем чебышевскими шпангоутами. Чебышевские шпангоуты должны быть двусторонними с построением как правой, так и левой ветвей шпангоута, а также линии бимсов. Количество чебышевских шпангоутов принимается от 9 до 14, в зависимости от типа судна и характера обводов.

При пользовании правилами трапеций или Симпсона необходимое для расчета количество шпангоутов на чертеже корпуса также уста-

---

[1]) Равнообъемные ватерлинии проводятся иногда через 10°, а иногда и через 5°, в зависимости от формы обводов корабля и требуемой точности расчетов.

навливается из соображений желаемой точности, характера обводов и т. д. Масштаб корпуса выбирается таким, чтобы половина ширины корабля измерялась отрезком длиной не менее 150 *мм*.

Первый способ акад. А. Н. Крылова. Первый способ акад. А. Н. Крылова дает наиболее точные результаты в тех случаях, когда объем надводной части корпуса не очень сильно отличается от объема подводной части. Для нанесения по этому способу на чебышевском корпусе равнообъемных ватерлиний проводят через точку O (пересечение следа диаметральной плоскости со следом ватерлиний) ряд вспомогательных ватерлиний, обычно через 10° (рис. 41), и снимают входящие ординаты a и выходящие b ватерлиний.

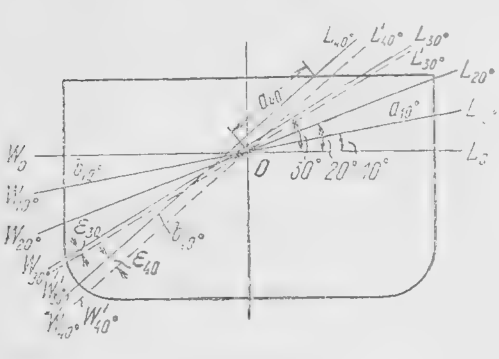


Рис. 41.

Сумма элементарных объемов вошедшего и вышедшего клиньев определяется выражением:

$$\Delta v_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{2} \int\limits_L (a^2 - b^2)_\varphi \, dx = \frac{\Delta\varphi}{2} \frac{L}{n} \sum_1^n (a^2 - b^2)_\varphi = \Delta\varphi m_\varphi, \qquad (175)$$

где m_φ — вычисляемый по правилу Чебышева статический момент площади ватерлинии относительно продольной оси, проходящей через точку O.

Полный объем входящих и выходящих клиньев при наклонении на угол θ равен

$$v_\theta = \int\limits_0^\theta m_\varphi \, d\varphi = \frac{\Delta\varphi}{2} \sum_0^\theta m_\varphi, \qquad (176)$$

где знак $\sum\limits_0^\theta m_\varphi$ символически изображает суммирование по схеме интегрирования с верхним переменным пределом.

Толщина поправочного слоя для ватерлинии, наклоненной на угол θ, равна

$$\varepsilon_\theta = \frac{v_\theta}{S_\theta} = \frac{\frac{1}{2}\int\limits_0^\theta \sum (a^2 - b^2)_\varphi \, d\varphi}{\sum (a+b)_\varphi}. \qquad (177)$$

Знание толщин ε_θ поправочного слоя позволяет построить на чебышевском корпусе равнообъемные ватерлинии, проведя их парал-

лельно вспомогательным на расстоянии ε_0 (рис. 41). При этом следует иметь в виду, что при положительных значениях ε равнообъемные ватерлинии проходят ниже вспомогательных, а при отрицательных — выше. Схема расположения вычислений приведена в табл. 36, составленной применительно к $n = 9$ чебышевским шпангоутам.

Построив на чертеже корпуса равнообъемные ватерлинии, вычисляют величины моментов инерции их площадей и метацентрические радиусы. Для этого снимают с чертежа входящие и выходящие ординаты (a и b) ватерлиний относительно лежащих в их плоскости произвольно выбранных продольных осей и производят вычисления по формулам:

$$I_\varphi = I_{0\varphi} - \eta_\varphi^2 S_\varphi, \tag{178}$$

где $I_{0\varphi}$ — момент инерции площади ватерлинии относительно той оси, от которой снимались входящие и выходящие ординаты,

$$I_{0\varphi} = \frac{1}{3} \int\limits_L (a^3 + b^3)_\varphi \, dx = \frac{1}{3} \frac{L}{n} \sum (a^3 + b^3)_\varphi, \tag{179}$$

S_φ — площадь наклоненной под углом φ равнообъемной ватерлинии

$$S_\varphi = \int\limits_L (a + b)_\varphi \, dx = \frac{L}{n} \sum (a + b)_\varphi, \tag{180}$$

η_φ — расстояние центра тяжести площади ватерлинии от оси, принятой при съемке ординат [формула (181)].

Метацентрический радиус для наклонной ватерлинии

$$r_\varphi = \frac{I_\varphi}{V}.$$

Ось отсчета ординат следует на-глаз выбирать таким образом, чтобы величина η_φ оказалась по возможности меньшей. Практическая схема расположения вычислений приведена в табл. 37.

Вычисление плеч остойчивости формы и координат центра величины и метацентра производится по формулам (165), (168) и (170).

$$y = \int\limits_0^\theta r_\varphi \cos \varphi d\varphi; \quad z = \int\limits_0^\theta r_\varphi \sin \varphi \, d\varphi, \tag{165}$$

$$l_\phi = y \cos \theta + z \sin \theta, \tag{168}$$

$$y_m = y - r_\theta \sin \theta; \quad z_m = z + r_\theta \cos \theta. \tag{170}$$

Схема вычислений приведена в табл. 38.

Если надводный объем мало отличается от подводного, что имеет место у высокобортных судов, можно пренебречь толщиной поправочного слоя и считать вспомогательные ватерлинии, пересекающиеся в общей точке O, совпадающими с равнообъемными. В этом случае возможно упростить расчет, отказавшись от вычислений, указанных

Таблица 36

Вычисление толщин ε_0 поправочного слоя

№ чебышевских шпангоутов	0°				10°				20°				30° и т. д.			
	a	b	a^2	b^2	a	b	a^2	b^2	a	b	a^2	b^2	a	b	a^2	b^2
1 2 3 4 5 6 7 8 9																
$\sum$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$
I	$\sum (a+b)_\varphi$		$\sum (a+b)_0$		$\sum (a+b)_{10}$				$\sum (a+b)_{20}$				$\sum (a+b)_{30}$			
II	$\sum (a^2-b^2)_\varphi$		$\sum (a^2-b^2)_0$		$\sum (a^2-b^2)_{10}$				$\sum (a^2-b^2)_{20}$				$\sum (a^2-b^2)_{30}$			
III	Сумма II по два и слева		0													
IV	$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{4} \frac{\text{III}}{\text{I}}$		0													
$\Delta\varphi = \frac{\pi}{18}$																

Таблица 37

Вычисление метацентрических радиусов r_φ для наклонных ватерлиний

№ чебышевских шпангоутов	0°						10°						20° и т. д.					
	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3
1 2 3 : 8 9																		
$\sum$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$
I	$\sum (a+b)$																	
II	$\sum (a^2-b^2)$																	
III	$\sum (a^3+b^3)$																	
IV	$\eta = \frac{\text{II}}{2\,\text{I}}$																	
V	$I_{C\varphi} = \frac{1}{3}\,\frac{L}{9}\,\text{III}$																	
VI	$\Delta I = \frac{L}{9}\,\text{I}\cdot\text{IV}^2$																	
VII	$I_\varphi = \text{V} - \text{VI}$																	
VIII	$r_\varphi = \frac{I_\varphi}{V}$																	

з табл. 36, и сразу приступить к вычислениям по табл. 37 и 38. Прием этот также указан акад. А. Н. Крыловым.

В тех случаях, когда объем надводной части корпуса сильно отличается от подводного, суммарный объем входящих и выходящих клиньев, вычисляемый по формуле (176), достигает большой величины, и определение толщины ε поправочного слоя по формуле (177) становится неточным. В этих случаях для построения равнообъемных ватерлиний следует применять второй способ акад. А. Н. Крылова.

Таблица 38

Вычисление плеч остойчивости формы и координат центра величины и метацентра для различных углов крена

Крен, θ (φ)	Метацентрический радиус, r_φ	$r_\varphi \cos\varphi$	Сумма III по два и сверху	$r_\varphi \sin\varphi$	Сумма V по два и сверху	Координаты ЦВ: $y = \frac{\Delta\varphi}{2}$ IV	Координаты ЦВ: $z = \frac{\Delta\varphi}{2}$ VI	$\text{VII}\cdot\cos\theta$	$\text{VIII}\cdot\sin\theta$	$l_\varphi = \text{IX} + \text{X}$	Координаты метацентра: $y_m = \text{VII} - \text{V}$	Координаты метацентра: $z_m = \text{VIII} + \text{III}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
0°	r_0	r_0	0	0								
10°	r_{10}	$r_{10}\cos 10°$		$r_{10}\sin 10°$								
20°	r_{20}	$r_{20}\cos 20°$		$r_{20}\sin 20°$								
30°	r_{30}	$r_{30}\cos 30°$										
40°												
50°												
60°												
70°												
80°												
90°												

Второй способ акад. А. Н. Крылова. По второму способу расчета вспомогательные ватерлинии проводятся не через одну точку O, а последовательно каждый раз через центр тяжести равнообъемной ватерлинии.

Первая вспомогательная ватерлиния проводится под углом $\Delta\theta$ к начальной ватерлинии через ее центр тяжести, т. е. через точку O. После этого снимаются входящие и выходящие ординаты вспомогательной

ватерлинии относительно точки O и вычисляется расстояние η центра тяжести наклонной ватерлинии от оси O по формуле

$$\eta = \frac{\int_0^L (a^2 - b^2)_{\Delta\theta}\, dx}{2\int_0^L (a + b)_{\Delta\theta}\, dx} = \frac{1}{2}\,\frac{\sum (a^2 - b^2)_{\Delta\theta}}{\sum (a + b)_{\Delta\theta}}. \qquad (181)$$

Толщина поправочного слоя равна

$$\varepsilon = \frac{\Delta\theta}{2}\,\eta. \qquad (182)$$

Вычислив толщину поправочного слоя, проводят параллельно вспомогательной равнообъемную ватерлинию на расстоянии ε, причем если $\varepsilon > 0$, то равнообъемная ватерлиния проходит ниже вспомогательной, а при $\varepsilon < 0$ — выше.

Ввиду малой толщины поправочного слоя считается, что центр тяжести f_1 равнообъемной ватерлинии лежит на одной вертикали с центром тяжести вспомогательной. Отсюда графически по известной η находят на чертеже положение центра тяжести равнообъемной ватерлинии.

Далее, через точку f_1 проводится новая вспомогательная ватерлиния, составляющая угол $2\,\Delta\theta$ с начальной, снимаются ее ординаты и определяются величины η_2 и ε_2. По найденным значениям η_2 и ε_2 строится равнообъемная ватерлиния для наклонения $2\,\Delta\theta$ и находится положение ее центра тяжести. Через точку f_2 проводится следующая вспомогательная ватерлиния, составляющая угол $3\,\Delta\theta$ с начальной, и все операции проводятся в том же порядке.

Взамен вычисления толщин поправочного слоя по формуле (182) может быть применено графическое построение, предложенное Дарньи. Сущность построения видна из рассмотрения рис. 42, где равнообъемные ватерлинии проведены сплошными линиями, а вспомогательные — пунктирными. Для построения равнообъемной ватерлинии W_1L_1 от точки O по начальной ватерлинии откладывается величина $OF_1 = \frac{1}{2}\,\eta_1$, равнообъемная ватерлиния W_1L_1 пройдет через точку F_1. Следующая равнообъемная ватерлиния, соответствующая наклонению на $2\,\Delta\theta$, пройдет через точку F_2, находящуюся на расстоянии $\frac{1}{2}\,\eta_2$ от точки f_1.

Так как толщины ε поправочных слоев получаются достаточно малыми, можно считать, что величины ординат равно объемных ватерлиний не будут заметно отличаться от ординат вспомогательных ватерлиний. Поэтому вычисление моментов инерции площадей можно производить по ординатам, снятым для вспомогательных ватерлиний. Это сильно сокращает объем расчета. Схема производства вычислений получается вполне аналогичной той, которая применяется для расчета метацентрических радиусов по первому способу и приведена в табл. 37. Схема вычисления плеч остойчивости формы приведена в табл. 38.

При установлении знаков входящих и выходящих ординат a и наклонной ватерлинии по отдельным шпангоутам следует руководствоваться следующими указаниями.

В большей части случаев точка f пересечения вспомогательной ватерлинии с действующей ватерлинией предыдущего наклонения, т. е. ЦТ предыдущей ватерлинии располагается внутри обвода шпан-

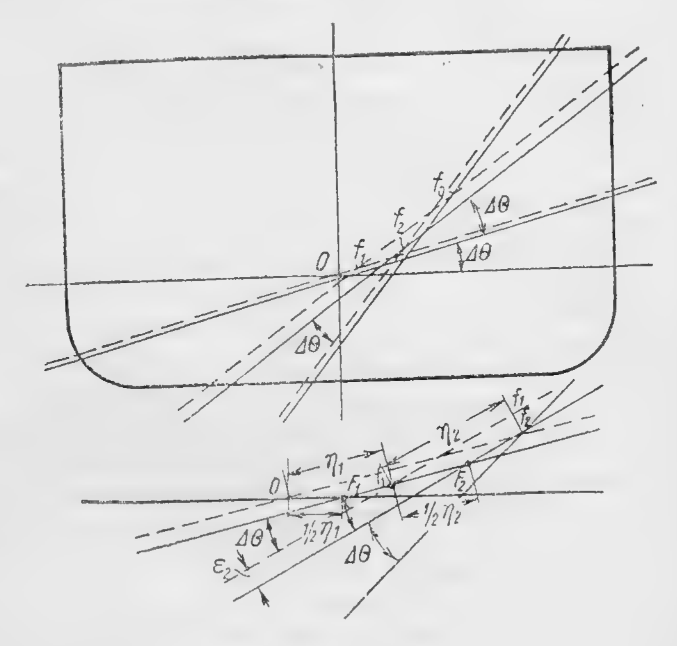


Рис. 42.

гоута (рис. 43, *а*). Положительным направлением для входящей ординаты $a = \overline{fA}$ считается вверх от ЦТ к точке A, для выходящей $b = \overline{fB}$ — вниз от ЦТ к точке B. Следовательно, если ЦТ f расположен внутри шпангоута, ординаты a и b положительны.

Если ЦТ располагается ниже отрезка AB, что может иметь место для шпангоутов оконечностей (рис. 43, *б*), входящая ордината $\overline{fA} = a$ положительна, выходящая $\overline{fB} = b$ — отрицательна.

Если ЦТ расположен выше отрезка AB (рис. 43, *в*) входящая ордината $\overline{fA} = a$ отрицательна, выходящая $\overline{fB} = b$ — положительна. Знаки, определенные в соответствии с изложенным правилом, ставятся перед ординатами a и b в таблице и автоматически входят во все последующие расчеты, т. е. кубы отрицательных ординат — также отрицательны (квадраты во всех случаях положительны) и при суммировании ординат и кубов ординат вычисляются их алгебраические суммы.

При пересечении вспомогательной ватерлинией шпангоута в четырех точках (рис. 43, *г*) в соответствующую строку таблицы вписываются два значения входящих ординат fA_1 и fA_2 и два значения

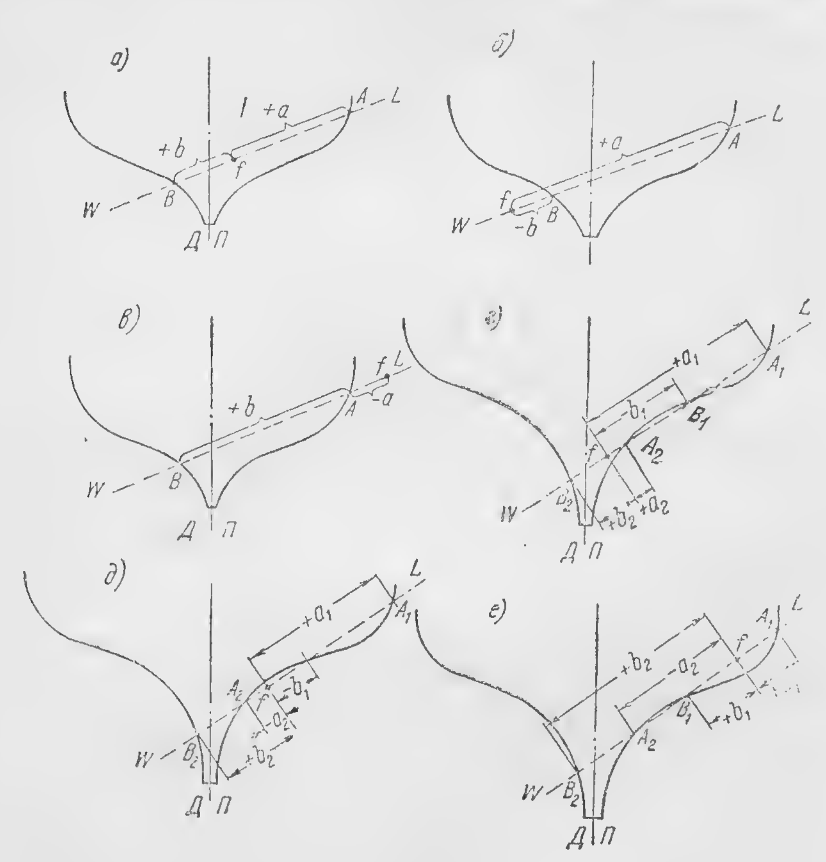


Рис. 43.

выходящих ординат fB_1 и fB_2 при сохранении такого же правила знаков.

В зависимости от положения ЦТ (точки f) может быть несколько комбинаций знаков двойных ординат.

1. Точка f лежит внутри шпангоута в нижней его части (рис. 43, *г*). Знаки: $+a_1$; $+a_2$; $-b_1$; $+b_2$.

2. Точка f лежит вне контура шпангоута между нижней и верхней его частями (рис. 43, *д*). Знаки: $+a_1$; $-a_2$; $-b_1$; $+b_2$.

3. Точка f лежит внутри шпангоута в верхней его части (рис. 43, *е*). Знаки: $+a_1$; $-a_2$; $+b_1$; $+b_2$.

Положения точки f вне контура выше точки A_1 или ниже точки B_2 мало вероятны. Одинаковые знаки у всех четырех ординат невозможны.

В случае двойных ординат в таблицу вписываются также двойные значения их квадратов и кубов с соблюдением правила знаков и суммируются обычным способом.

Вычисление плеч остойчивости формы, координат ЦВ и т. д. также может быть заменено предложенным Дарньи графическим построением полярной диаграммы.

Для построения полярной диаграммы вычисляют сначала, по предложению проф. В. Т. Струнникова, средние арифметические значения метацентрических радиусов:

$$r_1 = \frac{1}{2}(r_0 + r_{10})$$

$$r_2 = \frac{1}{2}(r_{10} + r_{20})$$

$$r_3 = \frac{1}{2}(r_{20} + r_{30})$$

. . . .

Затем проводится прямая $\overline{DD}$, которая должна изображать диаметральную плоскость (рис. 44). На этой прямой берется точка C_0 — центр величины прямого положения. От этой точки откладывается вверх по прямой $\overline{DD}$ отрезок r_0 и отмечается точка M_0 — метацентр для начального положения. От той же точки C_0 откладывается отрезок $C_0O_1 = \frac{1}{2}(r_0 + r_{10})$ и из точки O_1, как из центра, проводится дуга радиусом C_0O_1. Затем из точки O_1 проводится линия O_1C_{10}, составляющая угол 10° с диаметральной плоскостью. Точка пересечения ее с дугой определяет положение центра величины при наклонении 10°. От точки C_{10} по линии O_1C_{10} откладывается отрезок r_{10} и отмечается точка M_{10} — метацентр при положении 10°.

Далее, от этой же точки C_{10} откладывается отрезок $C_{10}O_2 = \frac{1}{2}(r_{10} + r_{20})$ и из точки O_2, как из центра, проводится дуга радиусом O_2C_{10} и прямая, составляющая угол 20° с диаметральной плоскостью. Точка C_{20} определяет положение центра величины при крене 20°. Продолжая построение, находят положения центра величины и метацентра для следующих наклонений. Кривая, соединяющая точки C_0, C_{10}, C_{20} и C_{30}, будет кривой центров величины, кривая, соединяющая точки M, будет метацентрической эволютой. Прямые CM будут линиями сил поддержания.

Опуская из точки C_0 перпендикуляры C_0R на линии действия сил поддержания, получают величины плеч остойчивости формы

$$(l_ф)_{10} = C_0R_{10}$$

и т. д.

Откладывая на диаметральной плоскости отрезок $a = z_g - z_c$, наносят точку g — центр тяжести судна. Из точки g опускают пер-

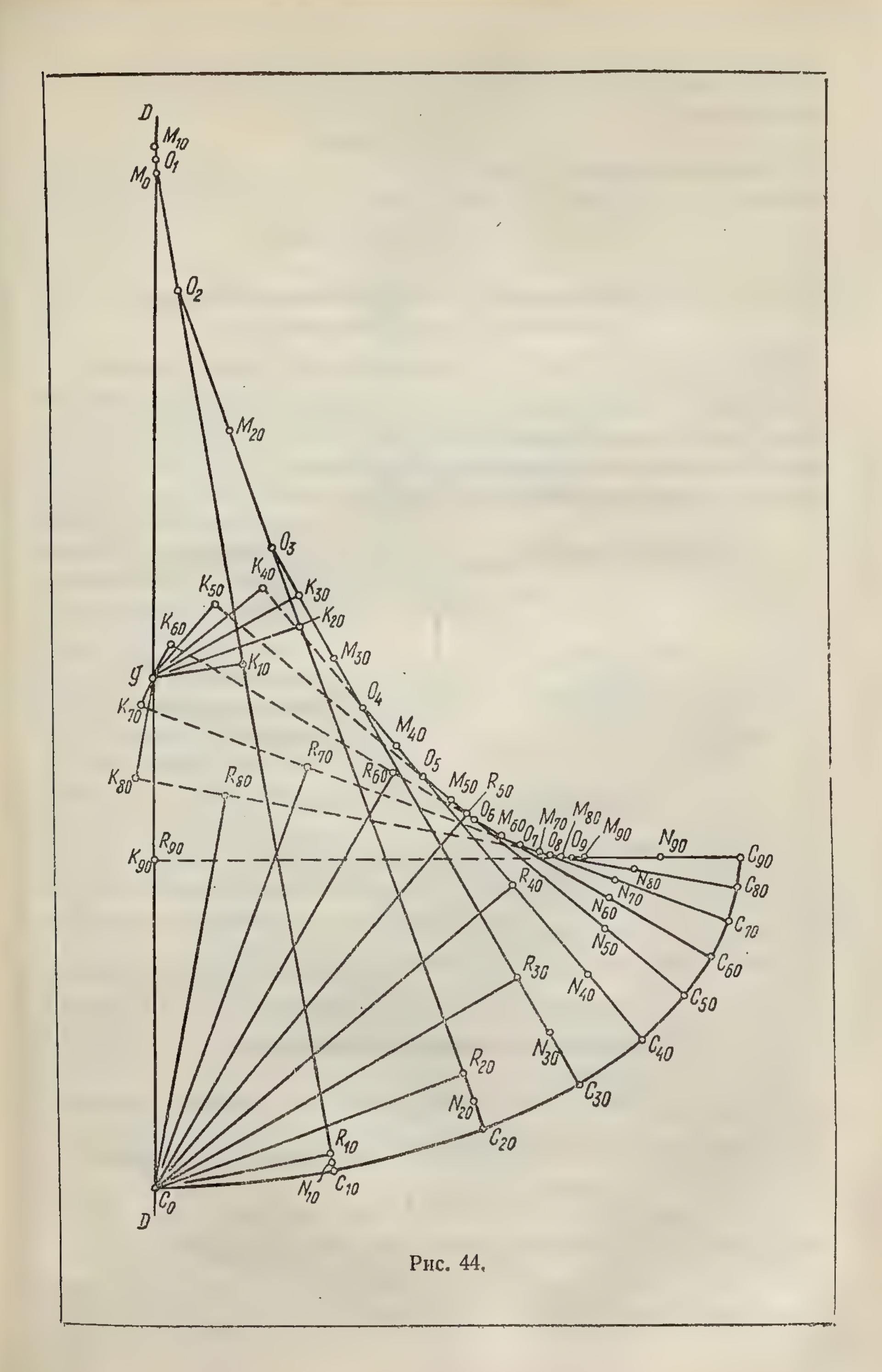

D
M_{10}
O_1
M_0
O_2
M_{20}
O_3
K_{50}
K_{40}
K_{30}
K_{20}
K_{60}
M_{30}
K_{10}
g
O_4
K_{70}
M_{40}
R_{70}
O_5
K_{80}
R_{80}
R_{60}
M_{50}
R_{50}
O_6
M_{60}
O_7
M_{70}
O_8
M_{80}
O_9
M_{90}
N_{90}
C_{90}
R_{90}
K_{90}
N_{80}
C_{80}
R_{40}
N_{70}
N_{60}
C_{70}
N_{50}
C_{60}
R_{30}
N_{40}
C_{50}
C_{40}
R_{20}
N_{30}
C_{30}
N_{20}
C_{20}
R_{10}
N_{10}
C_{10}
C_0
D

Рис. 44.

пендикуляры $\overline{gk}$ на направления сил поддержания и получают плечи остойчивости:

$$\overline{gk}_{10} = l_{10}; \quad \overline{gk}_{20} = l_{20}.$$

Беря на направлениях сил поддержания точки N на расстоянии a от точек k_0, получают величины плеч динамической остойчивости

$$C_{10}N_{10} = (l_d)_{10}; \quad C_{20}N_{20} = (l_d)_{20}$$

и т. д.

§ 35. РАСЧЕТ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА ПО МЕТОДУ Р. А. МАТРОСОВА

При расчете остойчивости судна на больших углах крена по способу Р. А. Матросова предполагается, что точки приложения сил тяжести и плавучести не изменяют своего положения при наклонении. В соответствующее равнообъемному наклонению положение судно может быть приведено путем вращения его около точки O (пересечение диаметральной плоскости с начальной ватерлинией) и параллельного всплытия или погружения, пока не сравняются объемы вошедшего и вышедшего при первом перемещении клиньев (рис. 45).

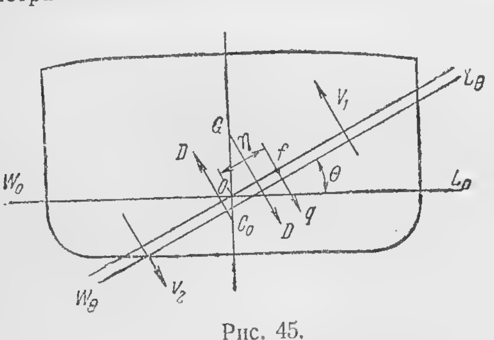


Рис. 45.

В результате этих двух перемещений появятся новые силы: плавучесть v_1 вошедшего клина, уничтоженная плавучесть v_2 вышедшего клина и уничтоженная плавучесть q вышедшего слоя. Кроме того, сила веса D и равная ей сила плавучести γV, взаимно уравновешенные в прямом положении, теперь будет образовывать кренящую судно пару $Da \sin\theta$, где a — возвышение центра тяжести над центром величины, а θ — угол крена.

Действие всех пяти сил образует восстанавливающий судно момент

$$\mathfrak{M} = Dl = \gamma(M - \mu) - Da \sin\theta, \tag{183}$$

где l — плечо диаграммы статической остойчивости;

M — момент клиньев;

μ — момент плавучести q слоя относительно принятой за начало приведения оси O.

Отсюда плечо диаграммы статической остойчивости выразится

$$l = \frac{\gamma(M-\mu)}{D} - a\sin\theta = l_ф - a\sin\theta, \tag{184}$$

где $l_ф$ — плечо остойчивости формы, определяемое выражением

$$l_ф = \frac{\gamma(M-\mu)}{D} = \frac{M-\mu}{V}, \tag{185}$$

Таблица 39

Расчет остойчивости судна на больших углах крена по методу Матросова

№ чебышевских шпангоутов	0°						10°						20° и т. д.					
	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3
1 2 ⋮ $n-1$ n																		
$\sum$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$
I	$\sum (a+b)$																	
II	$\sum (a^2-b^2)$																	
III	$\sum (a^3+b^3)$																	
IV	Сумма II попарно и слева																	
V	$v_1 - v_2 = \frac{\Delta\varphi}{4} \Delta L$ IV																	
VI	$\eta = \frac{\text{II}}{2\text{I}}$																	
VII	$\mu = \text{V} \cdot \text{VI}$																	
VIII	$I = \frac{\Delta L}{3}$ III																	

Таблица 40

Расчет остойчивости судна на больших углах крена по методу Матросова

$\Delta\varphi\, I_{60}$			—					
$\Delta\varphi\, I_{50}$				—				
$\Delta\varphi\, I_{40}$					—			
$\Delta\varphi\, I_{30}$						—		
$\Delta\varphi\, I_{20}$							—	
$\Delta\varphi\, I_{10}$								—
$\frac{\Delta\varphi}{2}\, I_0$								
	$\cos\varphi$	$\frac{1}{2}$	0,985	0,940	0,866	0,766	0,643	0,500
	φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	M	0						
	μ	0						
	$M-\mu$							
	$l_\varphi = \frac{M-\mu}{V}$							

Примечание. В верхнюю часть таблицы вписываются произведения $\Delta\varphi\, I_\varphi \cos\varphi$, где значения $\Delta\varphi\, I_\varphi$ берутся соответствующие данной строке и приведенные слева таблицы, а $\cos\varphi$ берутся соответственно данному столбцу внизу таблицы. Значения M получаются как результат суммирования по диагоналям чисел, стоящих в верхней части таблицы.

Вычисление моментов клиньев производится по формуле

$$M_\theta = \int_0^\theta I_{0\varphi} \cos(\theta - \varphi)\, d\varphi, \tag{186}$$

где

$$I_{0\varphi} = \frac{\Delta L}{3} \sum (a^3 + b^3)_\varphi. \tag{179}$$

Момент μ вычисляется по формуле:

$$\mu_\theta = (v_1 - v_2)_\theta\, \eta_\theta, \tag{187}$$

где $v_1 - v_2 = q$ — объем слоя при параллельном погружении, равный

$$v_1 - v_2 = \frac{\Delta L}{2} \int_0^\theta \sum (a^2 - b^2)_\varphi\, d\varphi; \tag{188}$$

η — расстояние центра тяжести площади ватерлинии от оси O.

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{\sum (a^2 - b^2)}{\sum (a + b)} .$$

Вычисление производится по схеме, приведенной в табл. 39 и 40.

Способ Матросова не может гарантировать необходимой точности, если подводный объем очень сильно отличается от надводного, и потому в таких случаях не может быть рекомендован.

§ 36. ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ КРИВЫЕ ПЛЕЧ ОСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ

Интерполяционные кривые плеч остойчивости формы служат для быстрого вычисления диаграммы статической остойчивости при различных вариантах нагрузки. Для построения интерполяционных кривых достаточно произвести расчет плеч остойчивости формы при

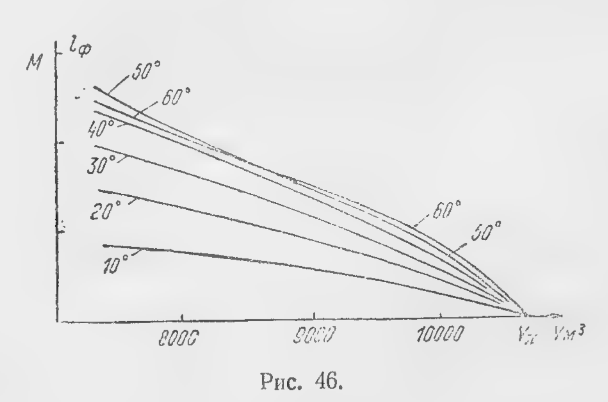


Рис. 46.

трех значениях водоизмещения, которые берутся в пределах от водоизмещения судна порожнем до водоизмещения полного погружения водонепроницаемого объема судна под воду. Величина водоизмещения V_π погружения может быть определена по масштабу Бонжана, если он вычислен для полных площадей шпангоутов от основной линии до верхней палубы. Определив водоизмещение порожнем V_0 и полного погружения V_π, устанавливают два промежуточные водоизмещения V_1 и V_2 и, проведя для каждого из них на корпусе соответствующие осадки, производят расчет плеч остойчивости формы любым способом (§ 34, 35). Затем строят график, откладывая по оси абсцисс водоизмещения V, а по оси ординат — соответствующие им значения плеч остойчивости формы для каждого наклонения. Соединяя концы ординат плавными кривыми, получают серии кривых, число которых равно числу наклонений (рис. 46).

При значении $V = V_\pi$ все кривые пересекают ось абсцисс.

При расчете диаграммы статической остойчивости нужно для заданного случая нагрузки определить водоизмещение и возвышение центра тяжести над центром величины $a = z_g - z_c$.

Ординаты диаграммы статической остойчивости определяются по формуле:

$$l_0 = l_ф - a \sin \theta,$$

где величины $l_ф$ снимаются с интерполяционных кривых.

Для повышения точности построения интерполяционных кривых рекомендуется воспользоваться дополнительными несложными построениями, которые дают направления касательных к кривым в расчетных точках.

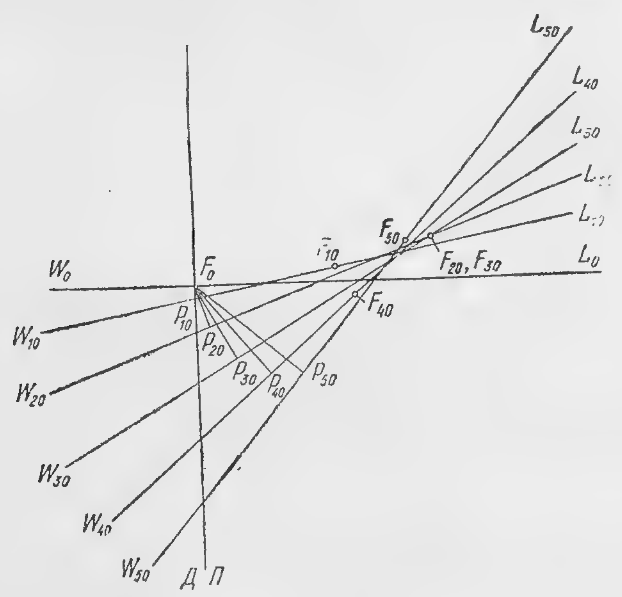


Рис. 47.

На чертеже чебышевского корпуса из точки пересечения исходной ватерлинии с диаметральной плоскостью опускаются перпендикуляры на каждую из действующих наклонных ватерлиний (рис. 47).

На каждой ватерлинии замеряется расстояние между основанием P перпендикуляра и точкой F (центром тяжести ватерлинии), представляющее плечо l_f катящейся кривой.

На интерполяционных кривых, в точке, соответствующей удвоенному расчетному водоизмещению, восстанавливается перпендикуляр к оси абсцисс (рис. 48). На этом перпендикуляре откладываются плечи $l_f = pF$ в масштабе, принятом для плеч остойчивости формы $l_ф$. При этом, если на чебышевском корпусе точка F расположена выше точки p, плечи l_f на чертеже интерполяционных кривых откладываются

вверх от оси абсцисс, в противном случае — вниз. Концы плеч l_f катящейся кривой, отложенные на перпендикуляре, соединяются с концами $l_ф$ плеч остойчивости формы прямыми, которые и будут каса-

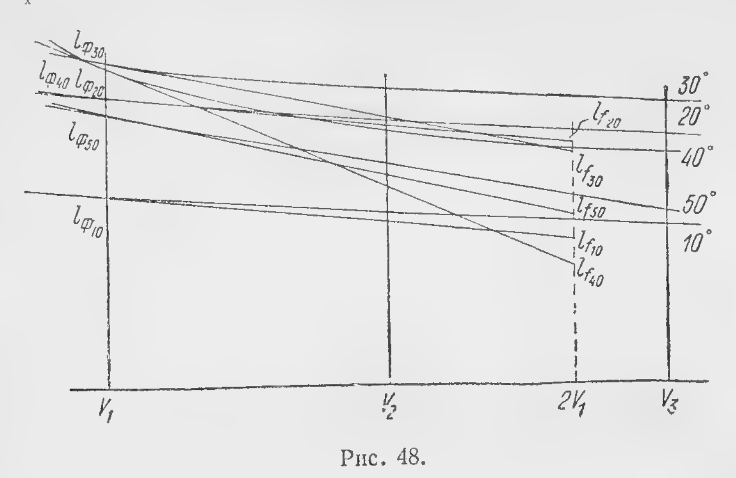


Рис. 48.

тельными к кривым $l_ф$. Во избежание затемнения чертежа интерполяционных кривых построение касательных рекомендуется наносить тонкими линиями, которые могут быть сняты резинкой.

§ 37. РАСЧЕТ ОСТОЙЧИВОСТИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕГРАТОРА

При расчете остойчивости с помощью интегратора определяют расстояние $\overline{y}$ центра величины наклоненного судна от оси pz, принятой за вертикаль (рис. 49).

Плечо остойчивости равно

$$l = \overline{y} - \overline{PG}\sin\theta. \quad (189)$$

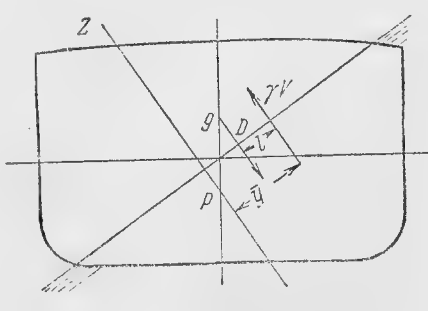


Рис. 49.

Расстояние $\overline{y}$ найдется, если определить величину погруженного объема судна в накрененном положении и момент его относительно оси pz. Для определения объема и его момента находят с помощью интегратора площади ω погруженной части шпангоутов и моменты их m относительно оси pz. По найденным величинам площадей и моментов строят кривые ω площадей шпангоутов и кривые m их моментов (рис. 50). Расстояние $\overline{y}$ получится как частное от деления площади кривой m на площадь кривой ω.

Для каждого наклонения величины $\overline{y}$ вычисляются при трех или четырех ватерлиниях, после чего по данным расчета строится диаграмма значений $\overline{y}$ в функции от V подобно интерполяционным кривым плеч остойчивости формы (§ 36). По оси абсцисс откладываются водоизмещения, а по оси ординат — соответствующие им значения $\overline{y}$. Полу-

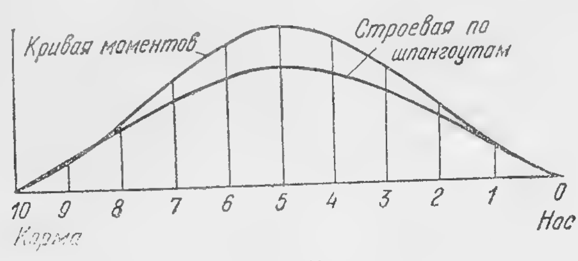


Рис. 50.

ченные точки соединяются плавной кривой, и таких кривых строят столько, сколько было сосчитано наклонений. Кривые $\overline{y}$ носят названия пантокарен (рис. 51).

Для выполнения расчета на листе белой бумаги вычерчиваются градусные деления через 10 или 15° от 0 до 90°. Затем на листе прозрачной кальки вычерчивается чертеж корпуса судна с полными очертаниями шпангоутов, а на другом листе кальки наносятся три или четыре ватерлинии и перпендикулярная им ось моментов pz. На корпусе судна строят обычно девять чебышевских шпангоутов. Масштаб чертежа выбирается в соответствии с размерами интегратора, причем для крупных судов обычно принимается масштаб 1/100, а для малых 1/25 натуральной величины.

Рис. 51.

На чертеже корпуса выбирается полюс P с таким расчетом, чтобы расстояние PG было возможно меньшим, т. е. чтобы полюс P лежал близ середины диапазона возможных положений центра тяжести G. Полюс P проставляется на чертеже ватерлиний на оси pz, после чего все чертежи накладываются один на другой так, что центр шкалы градусных делений и полюсы P совмещаются друг с другом, а ось pz совпадает с нулевым градусным делением (рис. 52). При этом вниз укладывается чертеж с градусными делениями, на него чертеж

корпуса, а сверху чертеж ватерлиний. Все три чертежа прикалываются в точке P острой иглой к доске, а верхний и нижний укрепляются кнопками. Таким образом, чертеж корпуса путем вращения вокруг точки P может быть установлен под любым углом к оси pz. Линейка интегратора устанавливается параллельно оси pz. После этого штифтом интегратора обводятся поочередно все шпангоуты по каждую ватерлинию и делаются отсчеты по роликам площадей и статических моментов.

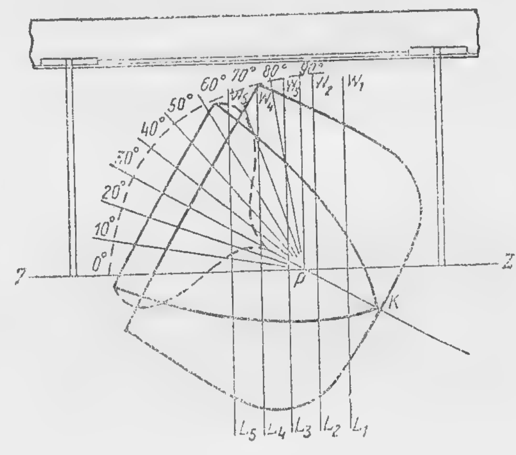


Рис. 52.

Размеры листа верхнего чертежа должны быть такими, чтобы ролики интегратора не переходили через его края.

Полезно в целях поверки делать отсчеты после обвода каждого шпангоута. Это позволит построить для каждого наклонения и водоизмещения кривые площадей и статических моментов шпангоутов, с помощью которых легко выявить все случайные ошибки расчета.

Вычисления могут быть расположены по схеме, приведенной в табл. 41 для 9 чебышевских шпангоутов.

Таблица 41

Расчет остойчивости на больших углах крена при помощи интегратора

№ отсчетов (чебышевские шпангоуты)	Отсчеты по интегратору			
	отсчеты по ролику площадей	разность отсчетов площадей	отсчеты по ролику моментов	разность отсчетов моментов
0	0172	—	9473	—
1	0286	114	8576	897
2	0972	686	7832	744
3	1723	751	7131	701
:	:	:	:	:
9	:	:	:	:
		Σ_1		Σ_2

Водоизмещение корабля

$$V = \frac{L}{9} C_1 m^2 \sum\nolimits_1, \qquad (190)$$

где L — длина корабля;

C_1 — коэффициент интегратора для площади, на который следует умножить разности отсчетов ролика площадей для получения площади кривой;

m — масштаб чертежа.

Величина плеча остойчивости

$$\bar{y} = m \frac{C_2 \sum_2}{C_1 \sum_1}, \qquad (191)$$

здесь C_2 — коэффициент интегратора для моментов.

При определении плеча $\bar{y}$ для наклонения 90° следует принять одну из ватерлиний совпадающей с диаметральной плоскостью, т. е. определить плечо $\bar{y}_{90}$ для водоизмещения, равного половине полного объема судна:

$$V = \frac{1}{2} V_{п}.$$

Тогда для полного объема $V_{п}$ значения плеч при любом наклонении θ определятся формулой:

$$\bar{y}_\theta = \bar{y}_{90} \sin\theta. \qquad (192)$$

§ 38. РАСЧЕТ ОСТОЙЧИВОСТИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА ПО СПОСОБУ Л. В. ДИКОВИЧА

При расчете остойчивости по способу Л. В. Диковича вычисляются ординаты пантокарен подобно тому, как это изложено в § 37, только без помощи интегратора. На начальной ватерлинии W_0L_0 (рис. 53) выбирается точка O_1 таким образом, чтобы проведенная через эту точку ватерлиния $W_{90}L_{90}$ под углом $\theta = 90°$ отсекала водоизмещение, равное на-глаз водоизмещению по начальную ватерлинию. Через точку O_1 проводятся наклонные ватерлинии под углом $\theta = 10°$, 20°, 30° и т. д. к начальной. Далее, на диаметральной плоскости выбирается полюс P, относительно которого берутся ординаты $\bar{y}$ пантокарен при всех расчетных осадках.

Значения ординат $\bar{y}$ определяются формулой:

$$\bar{y}_\theta = \frac{M_\theta + v_\theta (h \sin\theta + d \cos\theta) + V_0 (h - Z_w) \sin\theta}{V_\theta}. \qquad (193)$$

Здесь y_θ — ордината пантокарен, соответствующая водоизмещению V_θ по наклонную ватерлинию $W_\theta L_\theta$;

M_θ — момент клиньев, вычисляемый относительно точки O_1 совершенно так же, как по способу Матросова (§ 35):

$$M_\theta = \int_0 I_{0\varphi} \cos(\theta - \varphi)\, d\varphi, \tag{186}$$

где

$$I_{0\varphi} = \frac{\Delta L}{3} \sum (a^3 + b^3)_\varphi,$$

причем ординаты a и b измеряются от точки O_1.

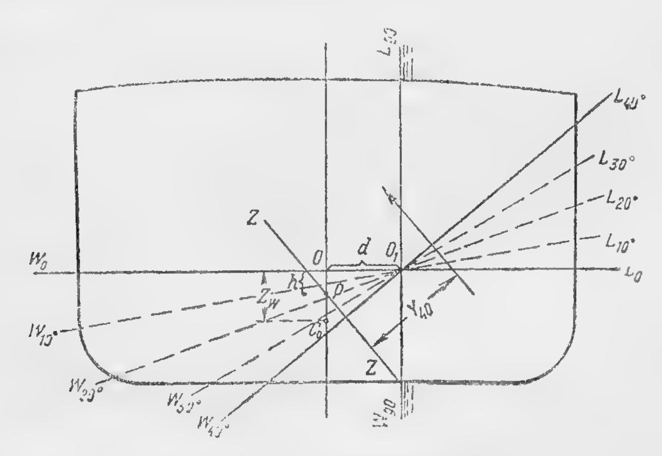


Рис. 53.

v_θ — разность объемов вошедших в воду и вышедших из нее клиньев, вычисляемая по такой же схеме, как и при способе Матросова:

$$v_\theta = v_1 - v_2 = \frac{\Delta L}{2} \int_0^\theta \sum (a^2 - b^2)_\theta\, d\varphi.$$

V_0 — водоизмещение по начальную ватерлинию;

Z_w — погружение ЦВ прямого положения под начальной ватерлинией;

$h = OP$ — расстояние полюса от начальной ватерлинии, причем $h > 0$, если P ниже ватерлинии.

$d = OO_1$ — расстояние точки O_1 от диаметральной плоскости, причем $d > 0$, если O_1 расположено в сторону входящего в воду борта.

Водоизмещение по наклонную ватерлинию $W_\theta L_\theta$ равно

$$V_\theta = V_0 + v_\theta.$$

Схема расчета аналогична применяющейся при способе Матросова (табл. 39 и 40) с той лишь разницей, что вместо дополнительного момента μ должен быть вычислен момент μ_1, равный

$$\mu_1 = v_\theta (h \sin\theta + d\cos\theta) + V_0 (h - Z_w)\sin\theta. \tag{194}$$

Рекомендуется принимать полюс P в начальном центре величины C_0. В этом случае

$$\mu_1 = v_\theta (Z_w \sin\theta + d\cos\theta). \tag{195}$$

§ 39. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ

Формула акад. В. Л. Поздюнина. Формула акад. В. Л. Поздюнина дает приближенные значения плеч статической остойчивости в зависимости от трех параметров (обозначаемых b, h и r_0), характеризующих форму корабля.

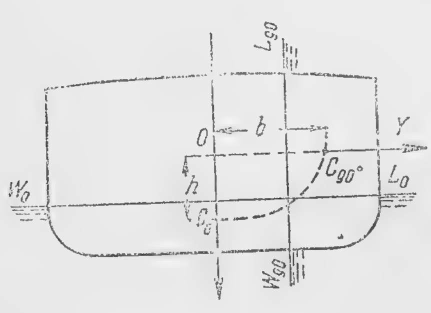


Рис. 54.

Здесь $b = y_{90}$ и $h = z_{90}$ — координаты центра величины при наклонении корабля на 90° (рис. 54), причем начало координатных осей принято в точке O, лежащей на h выше начального центра величины C_0. Параметр r_0 равен метацентрическому радиусу корабля в прямом положении.

Значения плеч статической остойчивости определяются формулой

$$l = \left\{ \frac{r_0}{\sqrt{1 + q^2 + \dfrac{3pq^2}{1 + (1-p)\,q^2}}} - \frac{h}{\sqrt{1 + \dfrac{1}{S^2} + \dfrac{3p}{1 - (1-p)\,S^2}}} - (a - h) \right\} \sin\theta. \tag{196}$$

Входящие в формулу (196) величины имеют следующие значения:

$$\left.\begin{aligned} q^2 &= m^2 \operatorname{tg}^2\theta, &\quad \text{где} \quad m &= \frac{r_0}{b} \\ S^2 &= \frac{m^4}{k^4}\frac{1}{q^2}, &\quad \text{»} \quad k &= \frac{b}{h} \\ p &= 1 - \frac{k}{m}, &\quad \text{»} \quad 1 - p &= \frac{k}{m} \end{aligned}\right\} \tag{197}$$

Схема вычислений ординат диаграммы статической остойчивости по формуле (196) приведена в табл. 42.

Вычисления значительно упрощаются, если в качестве исходного аргумента не брать угол θ, а задаваться координатой y центра вели-

чины. Согласно исследованию акад. В. Л. Поздюнина, между координатами y и z кривой центра величины и углом крена корабля существует зависимость, выражаемая следующими приближенными формулами:

$$\left.\begin{aligned} y &= b\sqrt{u} \\ z &= h\sqrt{\frac{1-u}{1-pu}} \\ q &= \frac{r_0}{b}\operatorname{tg}\theta = \frac{\sqrt{u}}{(1-pu)(1-u)}\sqrt{\frac{1-u}{1-pu}} \end{aligned}\right\} \qquad (198)$$

Задаваясь отношениями $u = \left(\frac{y}{b}\right)^2$, можно заранее подсчитать по формулам (198) соответствующие им значения $\frac{z}{h}$ и θ при различных значениях p. Определяя из полученных значений величины y, z и θ, можно вычислить плечи статической остойчивости по формуле теории корабля

$$l_\theta = y\cos\theta - z\sin\theta - (a-h)\sin\theta. \qquad (199)$$

В табл. 43 приведены величины

$$q = \frac{r_0}{b}\operatorname{tg}\theta,$$

сосчитанные по формуле (198) для ряда значений p при различных значениях u. Для удобства интерполирования в таблице даны также первые разности Δq в тысячных и сотых долях.

Таблица 42

Вычисление ординат диаграммы статической остойчивости по приближенной формуле акад. В. Л. Поздюнина

			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
$\theta°$	$\sin\theta$	$\operatorname{tg}^2\theta$	q^2	$\frac{1}{S^2}$	$3pq^2$	$1+(1-p)q^2$	$\frac{\text{III}}{\text{IV}}$	$1+\text{I}+\text{V}$	$\frac{r_0}{\sqrt{\text{VI}}}$	S^2	$1-(1-p)S^2$	$\frac{3p}{\text{IX}}$	$\text{I}+\text{II}+\text{X}$	$\frac{h}{\sqrt{\text{XI}}}$	$a-h+\text{XII}$	$\text{VII}-\text{XIII}$	$l = \text{XIV}\sin\theta$
0																	
10																	
20																	
. . .																	
90																	

Таблица 43

Значения величины, подсчитанной по формуле (198)

p	u = 0		u = 0,05		u = 0,10		u = 0,20		u = 0,30		u = 0,40		u = 0,50	
	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq
+0,30	0	0	0,235	2	0,348	5	0,548	17	0,755	35	0,988	60	1,280	110
+0,20	0	0	0,233	1	0,343	5	0,531	16	0,720	33	0,928	61	1,170	90
+0,10	0	0	0,232	2	0,338	5	0,515	16	0,687	32	0,867	50	1,080	80
0	0	0	0,230	2	0,333	5	0,499	14	0,655	30	0,817	48	1,000	72
−0,10	0	0	0,228	2	0,328	4	0,485	12	0,625	24	0,769	44	0,928	58
−0,20	0	0	0,226	1	0,324	5	0,473	15	0,601	25	0,725	41	0,870	58
−0,30	0	0	0,225		0,319		0,458		0,576		0,684		0,812	

p	u = 0,60		u = 0,70		u = 0,80		u = 0,90		u = 0,95		u = 1,00	
	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq
+0,30	1,65	16	2,18	26	3,02	42	4,82	77	7,20	122	∞	—
+0,20	1,49	14	1,92	22	2,60	34	4,05	59	5,98	93	∞	—
+0,10	1,35	13	1,70	17	2,26	27	3,46	46	5,05	70	∞	—
0	1,22	10	1,53	15	1,99	21	3,00	37	4,35	45	∞	—
−0,10	1,12	9	1,38	18	1,78	18	2,63	28	3,80	42	∞	—
−0,20	1,03	8	1,26	11	1,60	15	2,35	25	3,38	38	∞	—
−0,30	0,95		1,15		1,45		2,10		3,00		∞	—

Таблица 44

Величина отношения z/h для ряда значений p и u

p	$u=0$		$u=0{,}05$		$u=0{,}10$		$u=0{,}20$		$u=0{,}30$		$u=0{,}40$		$u=0{,}50$	
	$\frac{y}{b}=0$		$\frac{y}{b}=0{,}224$		$\frac{y}{b}=0{,}316$		$\frac{y}{b}=0{,}447$		$\frac{y}{b}=0{,}548$		$\frac{y}{b}=0{,}632$		$\frac{y}{b}=0{,}707$	
	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$
+0,30	1,000	—	0,983	2	0,962	4	0,924	11	0,876	12	0,826	18	0,767	21
+0,20	1,000	—	0,981	3	0,958	5	0,913	9	0,864	14	0,808	17	0,746	20
+0,10	1,000	—	0,978	3	0,953	4	0,904	10	0,850	13	0,791	16	0,726	19
0	1,000	—	0,975	2	0,949	5	0,894	8	0,837	13	0,775	16	0,707	17
−0,10	1,000	—	0,973	3	0,944	4	0,886	8	0,824	11	0,759	14	0,690	15
−0,20	1,000	—	0,970	2	0,940	5	0,878	8	0,813	11	0,745	14	0,675	15
−0,30	1,000	—	0,968		0,935		0,870		0,802		0,731		0,660	

p	$u=0{,}60$		$u=0{,}70$		$u=0{,}80$		$u=0{,}90$		$u=0{,}95$		$u=1{,}00$	
	$\frac{y}{b}=0{,}775$		$\frac{y}{b}=0{,}837$		$\frac{y}{b}=0{,}851$		$\frac{y}{b}=0{,}949$		$\frac{y}{b}=0{,}975$		$\frac{y}{b}=1{,}000$	
	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$	$\frac{z}{h}$	$\Delta\frac{z}{h}$
+0,30	0,699	24	0,617	27	0,513	25	0,371	23	0,265	16	0	—
+0,20	0,675	22	0,590	23	0,488	22	0,348	16	0,249	14	0	—
+0,10	0,653	21	0,567	19	0,466	19	0,332	16	0,235	11	0	—
0	0,632	18	0,548	19	0,447	17	0,316	13	0,224	10	0	—
−0,10	0,614	16	0,529	16	0,430	15	0,303	11	0,214	8	0	—
−0,20	0,598	16	0,513	15	0,415	13	0,292	11	0,206	8	0	—
−0,30	0,582		0,498		0,402		0,281		0,198		0	

В табл. 44 приведены величины отношений z/h для ряда значений p и u. Для удобства интерполирования приводятся первые разности отношений в тысячных и сотых долях.

Схема вычислений ординат диаграммы статической остойчивости по формуле (199) приведена в табл. 45.

Таблица 45

Вычисление ординат диаграммы статической остойчивости по формуле (199)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
u	y	z	q	$\operatorname{tg}\theta$	θ	$\cos\theta$	$\sin\theta$	$y\cos\theta$	$z+(a-h)$	$X\sin\theta$	$l=IX-XI$
0											
0,05											
0,10											
0,20											
0,30											
0,40											
0,50											
0,60											
0,70											
0,80											
0,90											
0,95											
1,00											

Примечание. Столбцы II и III заполняются по данным табл. 44, столбец IV — по данным табл. 43.

Необходимые для расчета параметры b и h могут быть определены по следующим приближенным формулам, полученным акад. В. Л. Поздюниным:

$$\left.\begin{aligned} b &= \frac{1}{2}\left(1 - C\frac{T}{H_1}\right)B \\ h &= C_1\left(1 - C_2\frac{T}{H_1}\right)H_1 \end{aligned}\right\} \qquad (200)$$

где для коэффициентов C, C_1 и C_2 могут быть приняты следующие значения[1]):

$$C = 0{,}972;\ C_1 = 0{,}64;\ C_2 = 1{,}032.$$

Для определения величины метацентрического радиуса можно воспользоваться любой из существующих приближенных формул (§ 18).

1) Рекомендуемые величины коэффициентов C являются средними и для различных типов судов могут отклоняться как в ту, так и в другую сторону. Более точные значения коэффициентов могут быть получены путем статистической проверки рекомендуемых формул для большого количества судов.

Входящий в формулы (200) размер H_1 представляет условную высоту борта, учитывающую наличие всех объемов, лежащих выше ватерлинии, проведенной через кромку верхней непрерывной палубы на миделе, иначе говоря, размер H_1 учитывает влияние погиби бимсов, седловатости и зачитываемых в водонепроницаемый объем надстроек. Величина H_1 может быть определена по приближенной формуле

$$H_1 = \left(1 + \frac{V_н}{V}\right)^{\chi} H \cong \left(1 + \chi \frac{V_н}{V}\right) H, \qquad (201)$$

где H — высота борта у миделя до верхней непрерывной палубы;

V — водоизмещение судна при осадке $T = H$;

$V_н$ — сумма всех объемов, расположенных выше ватерлинии, соответствующей осадке $T = H$;

χ — коэффициент вертикальной полноты.

Формула проф. В. Г. Власова. Формула проф. В. Г. Власова для приближенного определения плеча остойчивости может быть представлена в следующем виде, наиболее удобном для практических вычислений:

$$l = bf_1(\theta) + hf_2(\theta) + r_0 f_3(\theta) + r_{90} f_4(\theta) - a \sin\theta, \qquad (202)$$

где b, h и r_0 имеют такие же значения, как и в формулах (196) и (200), а r_{90} — метацентрический радиус корабля при наклонении его на 90°.

Входящие в формулу величины $f_1(\theta) - f_4(\theta)$ были предложены С. Н. Благовещенским и представляют некоторые тригонометрические функции от угла крена, численные значения которых приведены в табл. 46.

Величины четырех входящих в формулу параметров могут быть подсчитаны по теоретическому чертежу, либо, при отсутствии его, по приближенным формулам (200) акад. В. Л. Поздюнина. Значение мета-

Таблица 46

Значения вспомогательных функций к формуле В. Г. Власова

θ	$\sin\theta$	$f_1(\theta)$	$f_2(\theta)$	$f_3(\theta)$	$f_4(\theta)$
0	0	0	0	0	0
10	0,174	0,050	—0,036	0,151	0,010
20	0,342	0,337	—0,241	0,184	0,062
30	0,500	0,840	—0,556	0,081	0,135
40	0,643	1,279	—0,722	—0,069	0,155
50	0,766	1,365	—0,513	—0,155	0,069
60	0,866	1,056	0,026	—0,135	—0,081
70	0,940	0,583	0,603	—0,062	—0,184
80	0,985	0,210	0,935	—0,010	—0,151
90	1,000	0	1,000	0	0

центрического радиуса r_{90} может быть определено из следующей приближенной зависимости, указанной акад. В. Л. Поздюниным:

$$r_{90} = r_0 \left(\frac{h}{b}\right)^3.$$

Схема вычислений диаграммы статической остойчивости по формуле (202) приведена в табл. 47.

Таблица 47

Вычисление плеч остойчивости по приближенной формуле В. Г. Власова

I	II	III	IV	V	VI	VII
$\theta°$	$b\,f_1(\theta)$	$h\,f_2(\theta)$	$r_0 f_3(\theta)$	$r_{90} f_4(\theta)$	$-a \sin\theta$	$l = \mathrm{II} + \mathrm{III} + \mathrm{IV} + \mathrm{V} + \mathrm{VI}$
0 10 ⋮ 90						

Формула Н. А. Заботкина. Для приближенного определения плеча остойчивости может также служить формула Н. А. Заботкина:

$$l = a_1 \sin\theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + a_4 \sin 4\theta + a_5 \sin 5\theta + a_6 \sin 6\theta - a \sin\theta, \tag{203}$$

где величины $a - a_6$ определяются выражениями:

$$a = z_g - z_c;$$

$$a_1 = \frac{1}{32}\{2\,[2h + 7z_{180}] - [r_0 - r_{180}]\};$$

$$a_2 = \frac{1}{64}\{35\,[2b - z_{180}] - [r_0 - 2r_{90} + r_{180}]\};$$

$$a_3 = \frac{3}{64}\{[r_0 - r_{180}] + 6\,[z_{180} - 2h]\};$$

$$a_4 = \frac{1}{16}\{[r_0 + 2r_{90} + r_{180}] - [2b + z_{180}]\};$$

$$a_5 = \frac{5}{64}\{[r_0 - r_{180}] - 2\,[z_{180} - 2h]\};$$

$$a_6 = \frac{3}{64}\{[r_0 - 2r_{90} + r_{180}] - 3\,[2b - z_{180}]\}.$$

Здесь r_{180} — метацентрический радиус и z_{180} — координата центра величины при наклонении судна на 180°, причем начало координат

считается в начальном центре величины C_0. Прочие обозначения те же, что и в формулах Поздюнина и Власова.

Формула Н. А. Заботкина должна давать несколько более точный результат, нежели формула В. Г. Власова.

Формула Г. Е. Павленко. Проф. Г. Е. Павленко предложена следующая приближенная формула для плеча остойчивости:

$$l=\left[-2C\cos\theta-B\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)-(a-h)\right]\sin\theta, \qquad (204)$$

где

$$B=2{,}33\ [2b-(r_0+h)];$$

$$C=(b-r_0)-B.$$

Порядок точности формулы Павленко такой же, как формулы Власова.

Формула М. Л. Ольпинского[1]. Для приближенного вычисления плеч динамической остойчивости может служить формула М. Л. Ольпинского

$$l_d=bF_1(\theta)+hF_2(\theta)+r_0F_3(\theta)+r_{90}F_4(\theta)-a(1-\cos\theta), \qquad (205)$$

где значения постоянных величин те же, что и выше, а функции $F_1(\theta)-F_4(\theta)$ имеют значения, приведенные в табл. 48.

Таблица 48

Значение функций $F_i(\theta)$ в формуле М. Л. Ольпинского

$\theta°$	$1-\cos\theta$	$F_1(\theta)$	$F_2(\theta)$	$F_3(\theta)$	$F_4(\theta)$
0	0	0	0	0	0
10	0,015	0,0017	—0,0016	0,0142	0,0004
20	0,060	0,0317	—0,0392	0,0524	0,006
30	0,134	0,133	—0,093	0,0703	0,023
40	0,234	0,321	—0,208	0,071	0,050
50	0,357	0,558	—0,322	0,050	0,071
60	0,500	0,774	—0,367	0,023	0,070
70	0,658	0,917	—0,310	0,006	0,052
80	0,826	0,983	—0,170	0,0004	0,014
90	1,000	1,000	0	0	0

§ 40. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАДСТРОЕК НА ДИАГРАММУ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ ПО СПОСОБАМ В. В. СЕМЕНОВА ТЯН-ШАНСКОГО И А. В. ГЕРАСИМОВА

Влияние надстроек на диаграмму статической остойчивости может быть приблизительно учтено либо путем разнесения объема надстроек по всей длине корабля над палубой либо путем зачета площадей шпангоутов в районе надстройки до ее палубы. Оба эти способа

[1] Формула (205) была получена Ольпинским, как следствие формулы Влесова.

являются недостаточно точными и в отдельных случаях могут привести к большим погрешностям. Способ В. В. Семенова Тян-Шанского дает возможность вычислить поправки к величинам плеч остойчивости от влияния надстроек, причем точность расчета поправок соответствует точности основного расчета.

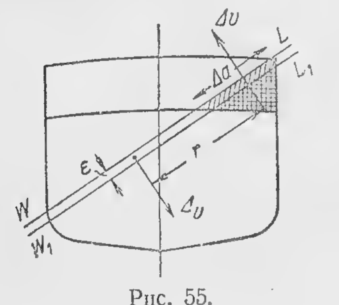


Рис. 55.

На рис. 55 WL — действующая ватерлиния без учета надстроек, W_1L_1 — действующая ватерлиния с их учетом, Δv — погруженный объем надстройки по ватерлинию WL, r — расстояние по горизонтали между ЦТ действующей ватерлинии WL и ЦТ вошедшего объема Δv.

Добавочные плечи остойчивости равны:

$$\Delta l = \frac{\Delta v}{V} \frac{S}{S + \Delta S} r, \tag{206}$$

где V — водоизмещение судна; S — площадь ватерлинии; ΔS — добавочная площадь ватерлинии от погружения надстройки.

Добавочный объем вычисляется по формуле:

$$\Delta v = \int_N \Delta\omega \, dx, \tag{207}$$

где $\Delta\omega$ — дополнительные площади шпангоутов в районе надстройки; N — длина надстройки.

Добавочная площадь ватерлинии равна

$$\Delta S = \int_N \Delta a \, dx, \tag{208}$$

где Δa — ординаты дополнительной ватерлинии.

Для вычисления величин Δv и ΔS длина надстройки делится на n равных частей и пробиваются сечения, соответствующие серединам полученных отсеков. Далее, в масштабе 1/20—1/25 вычерчиваются пробитые n сечений в части, ограниченной верхней палубой, бортами и палубой надстройки, и на этих сечениях наносятся действующие ватерлинии WL для различных углов крена, полученные в результате основного расчета остойчивости без учета надстроек. На каждой ватерлинии помечается соответствующий ЦТ ее площади (рис. 56).

Величины $\Delta\omega$ и r определяются с помощью интегратора, ординаты Δa снимаются с чертежа и дальнейшие расчеты выполняются по схеме, приведенной в табл. 49.

При отсутствии интегратора сечения надстройки вычерчиваются на картоне, вырезаются и наклеиваются друг на друга так, как показано на рис. 56. После этого сечения разрезаются по ватерлинии WL_{90} и путем подвешивания определяется положение ЦТ их для части, соответствующей погруженному объему. Величины r_{90} измеряются

и записываются в табл. 49. После этого склеенные сечения обрезаются по WL_{80} и находится новое плечо r_{80} и т. д.

Расчет сильно упрощается, если приходится учитывать только среднюю надстройку, расположенную в цилиндрической части судна, так как в этом случае достаточно определить одно лишь сечение $\Delta\omega$ и лишь одну ординату Δa.

Влияние надстроек на диаграмму статической остойчивости может быть учтено также по способу А. В. Герасимова. Сущность этого

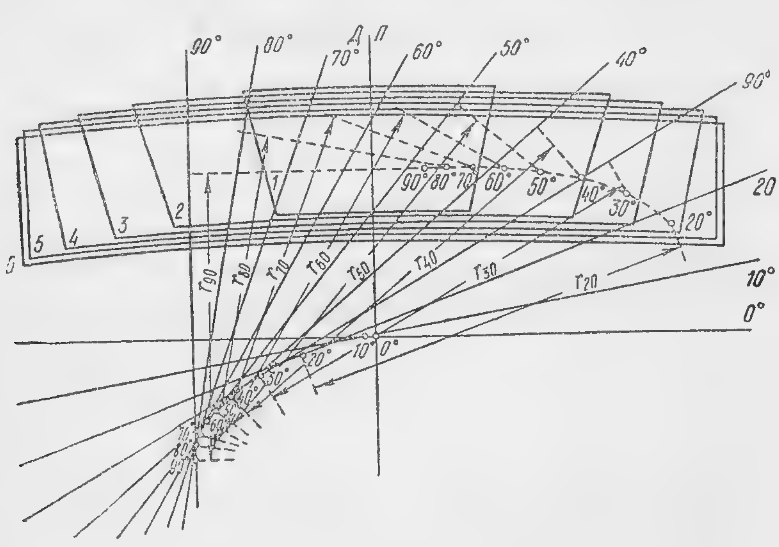


Рис. 56.

способа заключается в применении метода Крылова-Дарньи (§ 34) к случаю уступчатых наклонных ватерлиний, получающихся при входе в воду надстроек.

Если судно имеет одну надстройку в виде удлиненного бака, то удобно разделить корабль поперечной плоскостью, проходящей через кормовую переборку полубака на две части: носовую — длиной L_1 и кормовую — длиной L_2. По длине L_1 следует расставить n_1, а на длине L_2 — n_2 чебышевских шпангоутов и вычертить по этим данным чебышевский корпус, выделив, например, пунктиром шпангоуты носовой части. Число чебышевских шпангоутов в каждой оконечности корабля следует выбирать примерно пропорциональным длинам соответствующих частей с таким расчетом, чтобы общее количество их было не менее 12. Так, например, если длина полубака составляет 0,4 длины корабля, то в носовой части можно взять пять, а в кормовой семь чебышевских шпангоутов.

Проведение равнообъемных ватерлиний на подобном корпусе удобнее всего производить по методу Крылова-Дарньи (§ 34).

Таблица 49

Расчет влияния надстроек на диаграмму статической остойчивости по способу В. В. Семенова Тян-Шанского

		Осадка $T=$ Длина надстройки $N=$		Водоизмещение $V=$ $\Delta m=\frac{N}{n}=$								
		Углы крена		10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
		Добавочные ординаты		Δa_{10}	Δa_{20}	Δa_{30}	Δa_{40}	Δa_{50}	Δa_{60}	Δa_{70}	Δa_{80}	Δa_{90}
Таблица I для определения добавочных площадей ВЛ ΔS	№ сечений	1	м									
		2	"									
		3	"									
			"									
			"									
		n	"									
		$\sum \Delta a_0$	"									
		$\Delta S = \Delta m \sum \Delta a_0$	м²									
Таблица II для определения объемов вошедшей в воду надстройки без учета поправочного слоя Δv		Площади сечений		$\Delta\omega_{10}$	$\Delta\omega_{20}$	$\Delta\omega_{30}$	$\Delta\omega_{40}$	$\Delta\omega_{50}$	$\Delta\omega_{60}$	$\Delta\omega_{70}$	$\Delta\omega_{80}$	$\Delta\omega_{90}$
	№ сечений	1	м²									
		2	"									
		3	"									
			"									
			"									
		n	"									
		$\sum \Delta\omega_0$	"									
		$\Delta V = \Delta m \sum \Delta\omega_0$	м³									
Таблица III для вычислений добавочного плеча остойчивости формы	I	S	м²									
	II	ΔS (по табл. I)	"									
	III	$S + \Delta S$	"									
	IV	$S:(S+\Delta S)$	—									
	V	ΔV (по табл. II)	м³									
	VI	$\Delta V_1 = \Delta V \cdot \mathrm{IV}$	"									
	VII	$\frac{\Delta V_1}{V}$	—									
	VIII	r	м									
	IX	$\Delta l_ф = \mathrm{VIII} \cdot \mathrm{VII}$	"									
	X	$l_ф$	"									
	XI	$l_{ф1} = l_ф + \Delta l_ф$	"									

Таблица 50

Расчет влияния надстроек на диаграмму статической остойчивости по способу А. В. Герасимова

	Номера шпангоутов	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3
Носовая часть	1	a_{11}	b_{11}	a^2_{11}	b^2_{11}	a^3_{11}	b^3_{11}
	:	:					
	n_1	a_{1n_1}	b_{1n_1}	$a^2_{1n_1}$	$b^2_{1n_1}$	$a^3_{1n_1}$	$b^3_{1n_1}$
	Суммы	$\sum a_1$	$\sum b_1$	$\sum a^2_1$	$\sum b^2_1$	$\sum a^3_1$	$\sum b^3_1$
		$\sum (a_1 + b_1)$		$\sum (a^2_1 - b^2_1)$		$\sum (a^3_1 + b^3_1)$	
Кормовая часть	1	a_{21}	b_{21}	a^2_{21}	b^2_{21}	a^3_{21}	b^3_{21}
	:						
	n_2	a_{2n_2}	b_{2n_2}	$a^2_{2n_2}$	$b^2_{2n_2}$	$a^3_{2n_2}$	$b^3_{2n_2}$
	Суммы	$\sum a_2$	$\sum b_2$	$\sum a^2_2$	$\sum b^2_2$	$\sum a^3_2$	$\sum b^3_2$
		$\sum (a_2 + b_2)$		$\sum (a^2_2 - b^2_2)$		$\sum (a^3_2 + b^3_2)$	
I	$S_\theta = \Delta L_1 \sum (a_1 + b_1) + \Delta L_2 \sum (a_2 + b_2)$						
II	$m_\theta = \frac{\Delta L_1}{2} \sum (a^2_1 - b^2_1) + \frac{\Delta L_2}{2} \sum (a^2_2 - b^2_2)$						
III	$\eta_\theta = \frac{m_\theta}{S_\theta} = \frac{\text{II}}{\text{I}}$						
IV	$I_\theta = \frac{\Delta L_1}{3} \sum (a^3_1 + b^3_1) + \frac{\Delta L_2}{3} \sum (a^3_2 + b^3_2)$						
V	$\Delta I_\theta = S_\theta \eta^2_\theta = \text{I} \cdot \text{III}^2$						
VI	$I_{0\theta} = I_\theta - \Delta I_\theta = \text{IV} - \text{V}$						
VII	$r_\theta = \frac{I_{0\theta}}{V}$						

При этом для вычисления элементов полной площади наклонной ватерлинии, соответствующей крену θ, применяются формулы:

$$\left.\begin{aligned} S_\theta &= \Delta L_1 \sum (a_{1\theta} + b_{1\theta}) + \Delta L_2 \sum (a_{2\theta} + b_{2\theta}) \\ m_\theta &= \frac{1}{2} \Delta L_1 \sum (a^2_{1\theta} - b^2_{1\theta}) + \frac{1}{2} \Delta L_2 \sum (a^2_{2\theta} - b^2_{2\theta}) \\ I_\theta &= \frac{1}{3} \Delta L_1 \sum (a^3_{1\theta} + b^3_{1\theta}) + \frac{1}{3} \Delta L_2 \sum (a^3_{2\theta} + b^3_{2\theta}) \end{aligned}\right\} \quad (209)$$

Здесь S_0 — площадь всей ватерлинии;

m_0 — статический момент площади S_0 относительно оси отсчета ординат;

I_0 — момент инерции площади S_0 относительно той же оси;

a_{10} и b_{10} — входящая и выходящая ординаты шпангоутов носовой части корабля;

a_{20} и b_{20} — то же для кормовой части;

$$\Delta L_1 = \frac{L_1}{n_1} \text{ и } \Delta L_2 = \frac{L_2}{n_2}.$$

Вычисление входящих в формулы сумм и метацентрических радиусов производится по табл. 50.

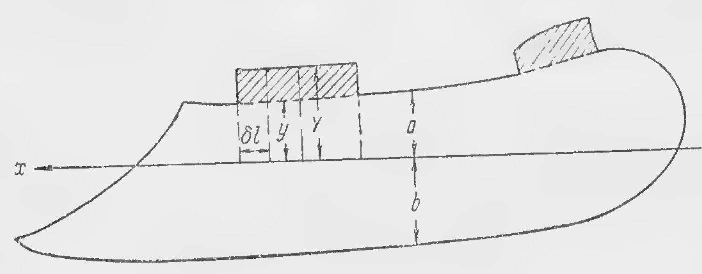


Рис. 57.

Построение следующей равнообъемной ватерлинии и дальнейший расчет плеч остойчивости формы производится по указаниям § 34 (табл. 37 и 38).

В случае наличия нескольких коротких надстроек целесообразно всю площадь ватерлинии (рис. 57) разбить на несколько частей, выделив основную часть ватерлинии, ограниченную верхней водонепроницаемой палубой, и остальные ее части, представляющие сечение, плоскостью ватерлинии непроницаемого объема надстроек. На рис. 57 линия раздела показана пунктиром, а площади ватерлинии в районе надстроек заштрихованы.

Вычисление площади S_0' основной части ватерлинии и ее моментов относительно оси отсчета x: статического m_0' и инерции I_0' производится, как обычно, по правилу Чебышева:

$$\left.\begin{aligned} S_0' &= \Delta L \sum (a + b) \\ m_0' &= \frac{1}{2} \Delta L \sum (a^2 - b^2) \\ I_0' &= \frac{1}{3} \Delta L \sum (a^3 + b^3) \end{aligned}\right\} \qquad (210)$$

Здесь a и b — входящая и выходящая ординаты ватерлинии, причем a с ч и т а е т с я д о в е р х н е й п а л у б ы, и $\Delta L = \frac{L}{k}$, где L — длина корабля, а k — число чебышевских шпангоутов.

Оставшаяся площадь $s_{i\theta}$, ее статический момент $\mu_{i\theta}$ и момент инерции $j_{i\theta}$ относительно оси x вычисляются порознь для каждой из заштрихованных на рис. 57 частей. Согласно правилу трапеций можно написать

$$\left.\begin{aligned} s_{i\theta} &= \delta l_i \sum\nolimits^* (Y_i - y_i) \\ \mu_{i\theta} &= \frac{1}{2} \delta l_i \sum\nolimits^* (Y_i^2 - y_i^2) \\ j_{i\theta} &= \frac{1}{3} \delta l_i \sum\nolimits^* (Y_i^3 - y_i^3) \end{aligned}\right\} \qquad (211)$$

Ординаты Y_i и y_i показаны на рис. 57, δl_i — расстояние между равноотстоящими ординатами, проведенными для вычисления площади s_i. Звездочками отмечено, что должны быть взяты исправленные суммы.

Ординаты y_i в формулах (211) представляют собой входящие ординаты основной части ватерлинии, как и ординаты a в формулах (210). Различием обозначения подчеркивается, что эти ординаты снимаются в разных местах по длине корабля.

Затем вычисляются площадь S_θ всей ватерлинии, ее моменты и соответствующий ей метацентрический радиус:

$$\left.\begin{aligned} S_\theta &= S_\theta' + \sum s_{i\theta} \\ m_\theta &= m_\theta' + \sum \mu_{i\theta} \\ I_\theta &= I_\theta' + \sum j_{i\theta} \\ \eta_\theta &= \frac{m_\theta}{S_\theta} \\ I_{0\theta} &= I_\theta - S_\theta \eta_\theta^2 \\ r_\theta &= \frac{I_{0\theta}}{V} \end{aligned}\right\} \qquad (212)$$

Для расчета остойчивости с учетом надстроек по этому способу необходимо вычертить чебышевский корпус без надстроек и затем нанести на него равноотстоящие сечения надстроек вместе с соответствующей частью сечения верхней палубы. Количество сечений по надстройкам зависит от формы надстроек и седловатости палубы. Для надстроек в средней части корабля обычно достаточно одного сечения. Построение равнообъемных ватерлиний производится по вычисляемым значениям η в соответствии с указаниями § 34.

§ 41. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ДИАГРАММУ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ

Влияние переноса груза. При перемещении груза в плоскости поперечного сечения судна измененные ординаты диаграммы статической остойчивости будут:

$$l_1 = l - \delta a \sin\theta - \delta b \cos\theta, \qquad (213)$$

где l — плечи статической остойчивости до перемещения груза; δa и δb — проекции перемещения центра тяжести судна соответственно на оси oz и oy.

Величины δa и δb равны:

$$\delta a = \mp \frac{p}{D} z; \quad \delta b = \frac{p}{D} y, \tag{214}$$

где p — вес перемещающегося груза;

z и y — проекции перемещения его на оси oz и oy. В выражении для δa знак плюс берется при подъеме груза, а минус — при опускании.

Влияние приема или снятия небольшого груза. В случае приема или снятия небольшого груза (до 10—15% от водоизмещения) измененные ординаты диаграммы статической остойчивости определятся формулой:

$$l_1 = k l_ф - a_1 \sin\theta, \tag{215}$$

где $l_ф$ — первоначальные значения плеч остойчивости формы, а величины k и a_1 определяются формулами:

$$k = \frac{D}{D \pm p}, \tag{216}$$

$$a_1 = a \mp \frac{p}{D \pm p}\left(T \pm \frac{\varepsilon}{2} - z - a\right); \tag{217}$$

здесь верхние знаки берутся в случае приема груза, а нижние — в случае снятия.

При расчете диаграммы статической остойчивости по способу Матросова поправка на изменение нагрузки может быть подсчитана по следующей формуле:

$$\Delta l = \pm \frac{p}{D \pm p}(\eta - z_0 \sin\theta); \tag{218}$$

здесь η — ордината центра тяжести площади ватерлинии, значение которой для каждого угла крена берется из табл. 39 (§ 35); z_0 — возвышение центра тяжести принимаемого груза над нормальной грузовой.

При больших изменениях нагрузки следует пользоваться интерполяционными кривыми плеч остойчивости формы или пантокаренами.

§ 42. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ КОРАБЛЯ НА ДИАГРАММУ ЕГО ОСТОЙЧИВОСТИ

При небольших изменениях главных размерений корабля L, B и H изменение плеча остойчивости, соответствующего наклонению корабля с исходными главными размерениями на угол θ, может быть определено по формулам В. В. Семенова Тян-Шанского:

$$\Delta l = [l \cos\theta + 2(l_d + a)\sin\theta]\cos\theta \frac{\Delta B}{B} +$$
$$+ [l \sin\theta - 2(l_d + a)\cos\theta]\sin\theta \frac{\Delta H}{H} +$$
$$+ [l_f - l + (T - z_g)\sin\theta]\frac{\Delta V}{V} - (z_g - kH)\sin\theta \frac{\Delta H}{H}, \tag{219}$$

где l — плечо остойчивости корабля с исходными главными размерениями;

l_d — плечо динамической остойчивости;

$a = z_g - z_c$ — возвышение центра тяжести над центром величины;

l_f — плечо катящейся кривой, равное расстоянию от точки пересечения диаметральной плоскости с горизонтальной ватерлинией до центра тяжести площади наклонной ватерлинии, измеренному параллельно последней. Если расчет производился по второму способу А. Н. Крылова (§ 34), то l_f может быть непосредственно измерено по чертежу равнообъемных ватерлиний § 36;

k — коэффициент, учитывающий изменение возвышения ЦТ над килем при изменении высоты борта H и принимаемый по материалам расчетов нагрузки. Предполагается, что измененное возвышение ЦТ определяется формулой:

$$Z_{g_1} = Z_g + k\Delta H. \tag{220}$$

Величина ΔV равна:

$$\Delta V = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right) V - \frac{\Delta D}{\gamma}. \tag{221}$$

Здесь через ΔD обозначено приращение весового водоизмещения корабля при изменении главных размерений:

$$\Delta D = D_1 - D. \tag{222}$$

При ориентировочных подсчетах величина ΔD может быть принята равной:

$$\Delta D = P_к \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right), \tag{223}$$

где $P_к$ — вес корпуса корабля, определяемый по расчету нагрузки.

Новое плечо остойчивости определяется по формуле:

$$l_1 = l + \Delta l. \tag{224}$$

Новое плечо остойчивости следует относить к новому углу наклонения, который равен:

$$\theta_1 = \theta + \Delta\theta. \tag{225}$$

Величина $\Delta\theta$ определяется по формуле:

$$\Delta\theta = \sin\theta\cos\theta\left(\frac{\Delta H}{H} - \frac{\Delta B}{B}\right). \tag{226}$$

Для суждения о новой диаграмме остойчивости практически достаточно вычислить плечи остойчивости для трех-четырех наклонений, в качестве которых рекомендуется принимать: а) угол крена, соответствующий максимуму исходной диаграммы остойчивости; б) угол ее заката; в) одно или два промежуточных наклонения. В совокупности с исходной диаграммой остойчивости вычисленные три или

четыре ординаты новой диаграммы дают достаточно отчетливое представление о ее характере.

Если надводный объем корпуса имеет величину, близкую к водоизмещению корабля, величины l_f плеч остойчивости катящейся кривой могут быть приняты равными нулю.

В частном случае изменения ширины и высоты борта, при сохранении длины и водоизмещения корабля постоянными, расчет изменения плеч остойчивости может быть произведен по нижеследующим формулам.

Относительные изменения главных размерений и величины z_g равны:

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\Delta H}{H} = -\frac{\Delta z_g}{z_g}; \qquad \frac{\Delta L}{L} = 0. \tag{227}$$

Изменение плеча остойчивости равно:

$$\Delta l = [l \cos 2\theta + 2(l_d + a) \sin 2\theta] \frac{\Delta B}{B}. \tag{228}$$

Изменение расчетного угла наклонения

$$\Delta\theta = -\sin 2\theta \frac{\Delta B}{B}. \tag{229}$$

В случае изменения ширины и длины, при сохранении высоты борта и водоизмещения постоянными, расчетные формулы будут:

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\Delta L}{L}; \qquad \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta z_g}{z_g} = 0; \tag{230}$$

$$\Delta l = [l \cos^2 \theta + (l_d + a) \sin 2\theta] \frac{\Delta B}{B}; \tag{231}$$

$$\Delta\theta = -\frac{1}{2} \sin 2\theta \frac{\Delta B}{B}. \tag{232}$$

В случае изменения высоты борта и длины, при сохранении ширины и водоизмещения корабля постоянными, расчетные формулы будут:

$$\frac{\Delta B}{B} = 0; \qquad \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta z_g}{z_g} = -\frac{\Delta L}{L}; \tag{233}$$

$$\Delta l = [l \sin^2 \theta - (l_d + a) \sin 2\theta] \frac{\Delta H}{H}; \tag{234}$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \frac{\Delta H}{H} \sin 2\theta. \tag{235}$$

В случае изменения ширины на ΔB и осадки на ΔT, при сохранении постоянными длины, высоты, водоизмещения и возвышения ЦТ, расчет может производиться по формулам:

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\delta}{\alpha} \frac{\Delta B}{B}; \qquad \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta z_g}{z_g} = 0; \tag{236}$$

$$\Delta l = [l(1 + \cos^2 \theta) + 2(l_d + a) \sin\theta \cos\theta -$$

$$- (T - z_g) \sin\theta - l_f] \frac{\Delta B}{B}; \tag{237}$$

$$\Delta\theta = 0. \tag{238}$$

При выводе всех приведенных формул предполагалось, что ординаты обводов корабля изменяются пропорционально соответствующим главным размерениям так, что коэффициенты полноты теоретического чертежа при всех вариантах изменения главных размерений остаются постоянными.

§ 43. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПО ДИАГРАММАМ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ

1. Определение по диаграмме статической остойчивости статического крена от действия кренящей пары. Пусть кренящая пара определяется зависимостью $\mathfrak{M} = f(\theta)$, заданной аналитически либо табличным или графическим способом. Для определения статического крена пара $\mathfrak{M}$ наносится на диаграмме статической остойчивости в одинаковом с ней масштабе. Если диаграмма статической остойчивости построена в масштабе плеч, вместо кривой кренящей пары $\mathfrak{M} = f(\theta)$ строится кривая кренящих плеч $l_{кр} = \frac{\mathfrak{M}}{D}$ (рис. 58).

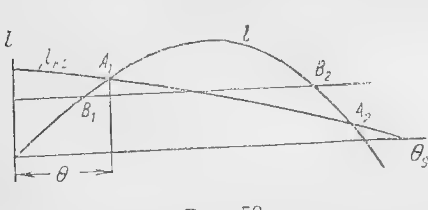


Рис. 58.

Кривая кренящих плеч пересекается с диаграммой статической остойчивости в точках A_1 и A_2, абсциссы которых определяют положения равновесия корабля. Точка A_1 соответствует устойчивому положению равновесия, а точка A_2 — неустойчивому. Абсцисса точки A_1 равна искомому статическому крену. Если кренящая пара постоянна, т. е. не зависит от крена, то точка пересечения ее прямой с восходящей ветвью диаграммы остойчивости (точка B_1 на рис. 58) соответствует устойчивому равновесию, а с нисходящей ветвью диаграммы (точка B_2) — неустойчивому.

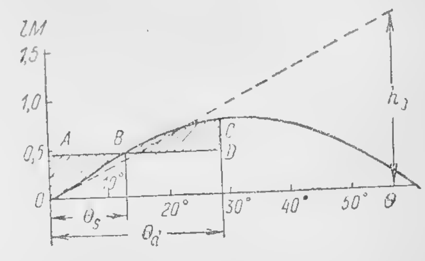


Рис. 59.

2. Определение динамического крена при внезапном приложении кренящей пары и отсутствии начального крена. В случае внезапного действия кренящей пары корабль по инерции переходит через положение равновесия и начинает совершать колебания около него. Наибольшее отклонение корабля от прямого положения, вычисленное в предположении отсутствия сопротивления воды, называется динамическим креном корабля. Величина динамического крена определяется из условия равенства работ кренящего и восстанавливающего моментов. По диаграмме статической

остойчивости динамический крен определяется из условия равенства заштрихованных на рис. 59 площадей AOB и BCD и равен абсциссе θ_d ординаты CD.

3. Определение динамического крена корабля, если он имел начальный крен. Пусть корабль имеет начальный крен от действия пары с кренящим плечом l_1 и на него внезапно

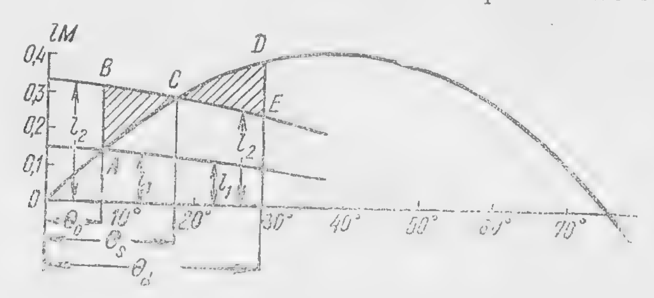


Рис. 60.

начинает действовать взамен первой новая пара с большим плечом l_2 в том же направлении (рис. 60). Динамический крен корабля в этом случае определяется из условия равенства заштрихованных площадей ABC и CDE и равен абсциссе θ_d ординаты DE.

Если вместо пары $\mathfrak{M}_1$ с плечом l_1 внезапно начинает действовать пара с плечом l_2, причем действие ее противоположно первоначальному

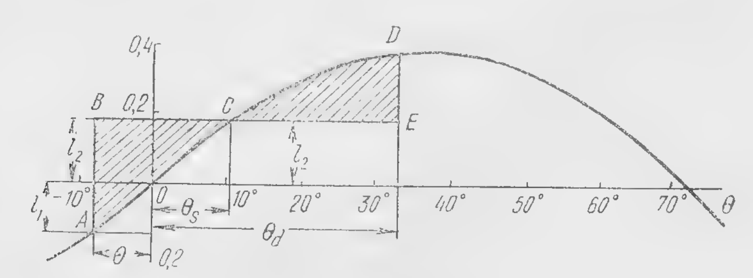


Рис. 61.

направлению действия пары $\mathfrak{M}_1$, динамический крен определится из условия равенства заштрихованных на рис. 61 площадей ABC и CDE, и искомый крен равен абсциссе θ_d ординаты DE.

Если корабль имеет начальный крен вследствие наличия отрицательной метацентрической высоты при отсутствии внешнего кренящего момента, динамический крен при внезапном приложении пары $\mathfrak{M}_1$ с плечом $l_{кр}$ определяется следующим образом. Если пара $\mathfrak{M}_1$ направлена в сторону увеличения начального крена (рис. 62), то динамический крен θ_d определится из условия равенства заштрихованных вертикально площадей ABC и CDE и равен абсциссе ординаты DE.

Если же пара $\mathfrak{M}_1$ действует в сторону уменьшения крена θ_0 и достаточно велика для того, чтобы перекренить корабль через прямое положение (рис. 62), то динамический крен определится из условия равенства заштрихованных площадей $AFGBC$ и CHJ и равен абсциссе θ_d' ординаты HJ.

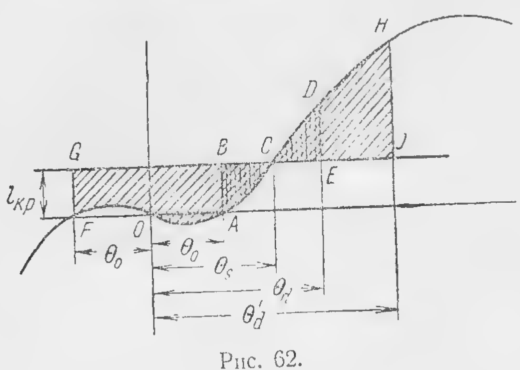


Рис. 62.

Если корабль имеет начальный крен θ_0 вследствие несимметричности нагрузки и на него внезапно действует пара $\mathfrak{M}_1$, стремящаяся увеличить наклонение корабля (рис. 63), то динамический крен определится из условия равенства заштрихованных площадей ABC и CDE и равен абсциссе θ_d ординаты DE. Статический крен во всех рассмотренных случаях действия кренящих пар определяется, как абсцисса точки пересечения кривых кренящих и восстанавливающих плеч на рис. 59—63 и обозначается через θ_s.

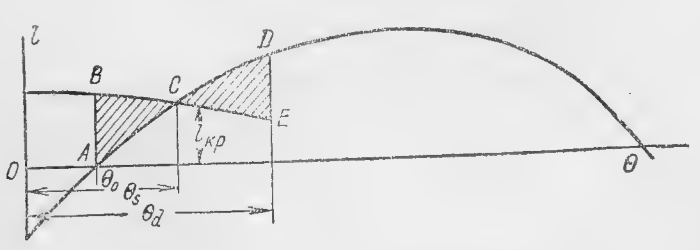


Рис. 63.

4. Определение динамического крена корабля по диаграмме динамической остойчивости в случае внезапного действия на него постоянной кренящей пары. Пусть дана диаграмма динамической остойчивости и величина кренящего плеча задана отрезком ab (рис. 64). Для определения динамического крена откладывается при абсциссе, равной одному радиану ($\theta = 57{,}3°$), отрезок $cd = ab$ и точка d соединяется наклонной прямой с началом координат. Абсцисса точки A пересечения наклонной прямой с диаграммой динамической остойчивости равна искомому

динамическому крену θ_d. В случае переменной по углу крена кренящей пары на диаграмме динамической остойчивости должна быть построена интегральная кривая плеч кренящей пары (кривая работ). Абсцисса точки пересечения интегральной кривой с диаграммой динамической остойчивости дает искомый угол динамического крена.

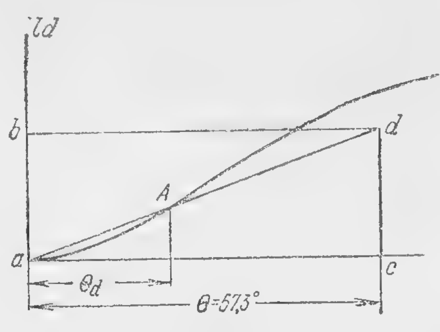


Рис. 64.

5. Определение максимального постоянного кренящего момента, выдерживаемого кораблем при статическом и динамическом его действии. Выдерживаемый судном предельный максимальный момент, при статическом его приложении, равен максимальной ординате диаграммы статической остойчивости, построенной в масштабе моментов. Предельный момент, выдерживаемый судном при динамическом действии, определяется следующим построением. К диаграмме динамической остойчивости проводится касательная из начала координат. Ордината ab этой касательной при абсциссе, равной одному радиану (57,3°), дает величину плеча искомого предельного момента (рис. 65).

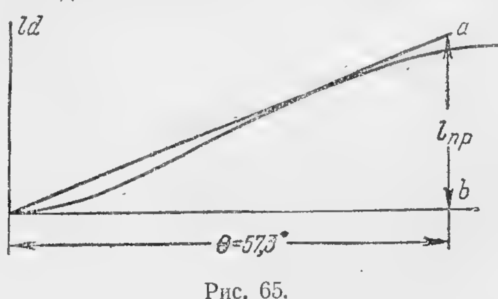


Рис. 65.

§ 44. ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА

Остойчивость в подводном положении. Для вполне погруженной в воду подводной лодки диаграмма статической остойчивости имеет вид синусоиды.

$$l = a_0 \sin \theta, \tag{239}$$

где a_0 — возвышение центра величины над центром тяжести.

Остойчивость в надводном положении. Остойчивость подводной лодки в надводном положении может быть определена либо по методу Крылова, либо с помощью интегратора.

Под основной остойчивостью подводной лодки понимают ее остойчивость, вычисленную в предположении, что находящаяся в систернах вода не переливается и не изменяется по количеству.

Для повышения точности расчет основной остойчивости полезно вести не для погруженного, а для выходящего объема с последующим пересчетом на погруженный объем. Так, если v — выходящий объем (рис. 66), V — погруженный и y' — пантокарена для выходящего объема, вычисленная относительно полюса, совпадающего с центром величины $C_п$ подводного положения, то пантокарена погруженного объема относительно того же полюса $C_п$ равна:

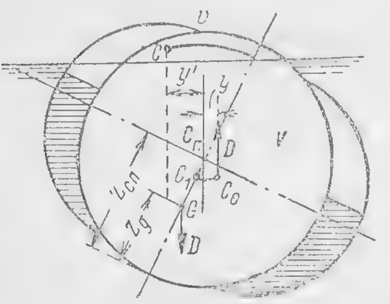


Рис. 66.

$$y = \frac{v}{V} y'. \tag{240}$$

Плечо основной остойчивости равно:

$$l_0 = y - a_1 \sin \theta, \tag{241}$$

где $a_1 = z_g - z_c$ и z_c — возвышение центра величины надводного положения над основной.

Основной выпрямляющий момент:

$$M = Dl_0.$$

Для удобства расчета остойчивости подводной лодки в любом промежуточном положении полезно иметь пантокарены или кривые плеч остойчивости формы в зависимости от водоизмещения для нескольких углов крена и дифферента.

Влияние переливания воды в систернах должно быть учтено путем вычисления поправок к основному выпрямляющему моменту:

$$\delta\mathfrak{M} = \delta M + \delta M'.$$

Поправочный момент δM вычисляется по формулам:

$$\left.\begin{aligned} &\delta M = -\gamma (A \cos \theta + B \sin \theta) \\ &A = \int_0^\theta I_\varphi \cos \varphi \, d\varphi; \quad B = \int_0^\theta I_\varphi \sin \varphi \, d\varphi \\ &I_\varphi = \sum i + \sum j_\varphi, \end{aligned}\right\} \tag{242}$$

где i — момент инерции свободной поверхности воды в систерне относительно оси, проходящей через центр тяжести ее площади, а j_φ — момент инерции свободной поверхности относительно диаметральной плоскости подводной лодки. Первая сумма распространяется на все одиночные и бортовые систерны, не имеющие водяного сообщения. Вторая сумма распространяется на бортовые систерны, имеющие водяное и воздушное сообщение.

Второй поправочный момент учитывает влияние упругости воздуха в случае отсутствия воздушного сообщения (рис. 67):

$$\delta M' = \sum \delta M_i'; \tag{243}$$

$$\delta M_i' = -\frac{\gamma S \lambda H}{\frac{2p_0 S}{\gamma W_0} + \frac{S + S'}{S'}}, \tag{244}$$

где S — площадь свободной поверхности в систерне входящего в воду борта;

S' — то же для выходящего борта;

λ — отсчитываемое в поперечной плоскости расстояние между проекциями на ватерлинию W_0L_0 центров тяжести свободных поверхностей;

H — разность уровней воды в систернах при крене θ;

p_0 — давление воздуха в систернах при прямом положении подводной лодки;

W_0 — объем воздуха в каждой из систерн при прямом положении подводной лодки;

γ — вес единицы объема воды.

Полный выпрямляющий момент

$$\mathfrak{M} = M + \delta\mathfrak{M}. \tag{245}$$

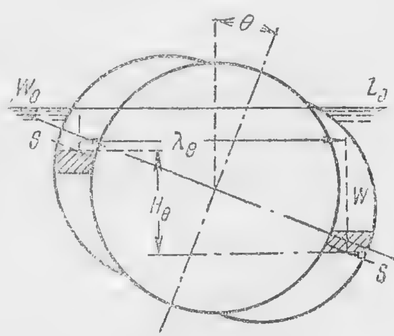


Рис. 67.

Плечо статической остойчивости определится по формуле:

$$l = \frac{\mathfrak{M}}{D} = l_0 + \Delta l, \tag{246}$$

где l_0 — плечо основного момента, определяемое по пантокаренам для водоизмещения D;

Δl — плечо поправочного момента

$$\Delta l = \frac{\delta\mathfrak{M}}{D}. \tag{247}$$

У лодок, имеющих бескингстонные систерны главного балласта с разобщенной вентиляцией, количество воды в систернах будет при крене изменяться. Водоизмещение подводной лодки при этом также изменится и будет равно:

$$V = V_0 + v_{л} + v_{п}, \tag{248}$$

где V_0 — водоизмещение в прямом положении;

$v_{л}$ и $v_{п}$ — объем влившейся воды в систерны левого и правого бортов.

Плечо статической остойчивости определится по формуле:

$$l = l_0 - \Delta l, \tag{249}$$

где l_0 — плечо основной остойчивости, определяемое посредством пантокарен для водоизмещения V, устанавливаемого по формуле (248);

Δl — изменение плеча статической остойчивости от неравномерного поступления воды в бескингстонные систерны правого и левого бортов при крене, равное

$$\Delta l = \Delta y \cos \theta + \Delta z \sin \theta; \qquad (250)$$

здесь Δy — перемещение ЦТ лодки, перпендикулярное ее диаметральной плоскости:

$$\Delta y = \frac{v_л y_л - v_п y_п}{V_0 + v}; \qquad (251)$$

Δz — вертикальное перемещение ЦТ лодки:

$$\Delta z = \frac{v_л (z_л - z_g) + v_п (z_п - z_g)}{V_0 + v}, \qquad (252)$$

где $y_л$, $z_л$, $y_п$, $z_п$ — координаты ЦТ влившейся воды в систерны левого и правого бортов.

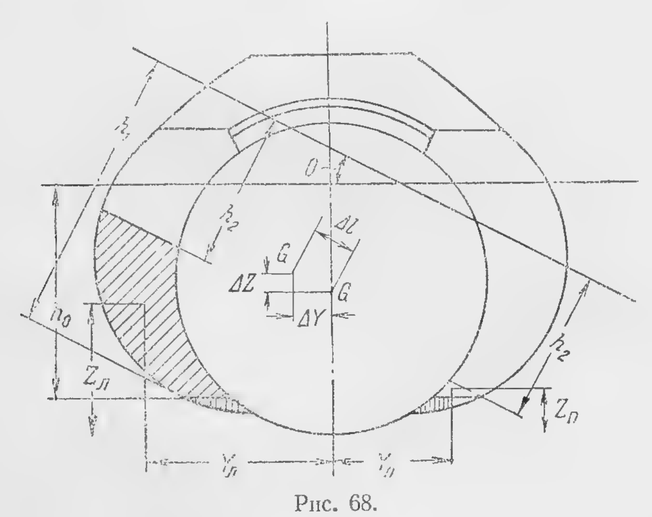


Рис. 68.

Количество воды, вливающейся в систерны, может быть определено из того условия, что уровень воды в систернах при прямом и наклонном положениях будет параллельным действующей ватерлинии и будет проходить через верхнюю кромку шпигатов каждого борта.

В случае сообщенной вентиляции бескингстонных систерн правого и левого бортов уровень воды в них будет устанавливаться в плоскости, параллельной наклонной ватерлинии, и будет проходить через верхнюю кромку вырезов выходящего борта (рис. 68). Плечо статической остойчивости при крене определяется тем же способом, что и для бескингстонных систерн с разобщенной вентиляцией, но величина поправки Δl в этом случае будет значительно больше.

ГЛАВА IV

НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ СУДОВ

§ 45. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Непотопляемость — свойство корабля сохранять в достаточной мере мореходные качества при затоплении на нем одного или нескольких отсеков или отделений.[1] Задачей расчетов непотопляемости является определение изменения осадки, крена, диферента и остойчивости корабля после затопления на нем ряда отделений.

При затоплении на корабле мелких отделений, суммарный объем которых мал по сравнению с водоизмещением корабля, расчет непотопляемости может быть выполнен с помощью метацентрических формул. При этом при расчете углов крена и диферента обводы корабля и отсека в районе изменения ватерлинии предполагаются круговые, а при расчете среднего углубления — прямостенные.

При затоплении больших отсеков, вызывающем большие изменения осадки, крена и диферента, расчет по метацентрическим формулам будет недостаточен. В этом случае требуется произвести расчет во втором приближении, учитывая влияние непрямостенности обводов и погрешности метацентрических формул.

В случае, если расчет по метацентрическим формулам приводит к большому крену и большому изменению остойчивости корабля после затопления, следует для надежной оценки остойчивости поврежденного корабля построить для него диаграмму статической остойчивости в поврежденном состоянии.

Для коммерческих судов, разделяющихся поперечными переборками на большие отсеки, простирающиеся от борта до борта, бывает необходимо определить наибольшее расстояние между переборками так, чтобы при затоплении одного или нескольких отсеков величина погружения судна не превосходила определенного предела. Поэтому для коммерческих судов приходится рассчитывать кривую распределения переборок, ординаты которой определяют наибольшее допустимое расстояние между двумя соседними переборками.

---

[1] В военном кораблестроении отсеками принято называть большие пространства на корабле, отгороженные водонепроницаемыми переборками. Отсеки, в свою очередь, подразделяются водонепроницаемыми переборкам на более мелкие помещения, называемые отделениями.

Для быстрого приближенного определения изменения осадки корабля при затоплении на нем небольших простирающихся от борта до борта отсеков может служить диаграмма переуглубления И. Г. Бубнова.

При решении задач непотопляемости могут быть применены два метода: метод приема груза и метод постоянного водоизмещения.

При применении метода приема груза влившуюся внутрь корабля воду рассматривают как принятый груз, увеличивающий водоизмещение корабля и влияющий на положение его центра тяжести.

При применении метода постоянного водоизмещения затопленный отсек считается как бы не принадлежащим кораблю. Водоизмещение корабля и координаты его центра тяжести предполагаются неизменными. Изменяются лишь обводы корабля за счет выделения из него затопленного отсека.

Оба способа дают различные расчетные формулы и схемы и разные значения метацентрической высоты. Однако конечные результаты расчета посадки и коэффициентов остойчивости по обоим методам должны быть совершенно одинаковы.

§ 46. РАСЧЕТ ПО МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИМ ФОРМУЛАМ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ЕДИНИЧНОГО ОТСЕКА

Затопление отделения, не сообщающегося с забортной водой. Принятые обозначения:

p — вес принятой воды;

x, y, z — координаты центра тяжести объема влившейся воды;

i — момент инерции свободной поверхности воды в отделении относительно продольной оси, проходящей через ЦТ площади свободной поверхности; для отделений, закрытых сверху и затопленных доверху, $i = 0$.

Изменение средней осадки:

$$\varepsilon = \frac{p}{\gamma S_0}. \tag{253}$$

Изменение поперечной метацентрической высоты:

$$\Delta h = \frac{p}{D+p}\left(T + \frac{\varepsilon}{2} - h - z - \frac{\gamma i}{p}\right), \tag{254}$$

новая метацентрическая высота:

$$h_1 = h + \Delta h. \tag{255}$$

Угол крена:

$$\theta = \frac{py}{(D+p)(h+\Delta h)}. \tag{256}$$

Угол диферента:

$$\psi = \frac{p(x - x_f)}{DH}. \tag{257}$$

Изменение осадки носом и кормой:

$$\left.\begin{aligned}\Delta T_{\text{н}} &= \varepsilon + \left(\frac{L}{2} - x_f\right)\psi \\ \Delta T_{\text{к}} &= \varepsilon - \left(\frac{L}{2} + x_f\right)\psi\end{aligned}\right\} \quad (258)$$

Затопление отделения, сообщающегося с забортной водой.

Принятые обозначения:

s — потерянная площадь ватерлинии, т. е. площадь поверхности воды в затопленном отсеке;
a, b — координаты ЦТ потерянной площади;
i_x, i_y — моменты инерции потерянной площади относительно продольной и поперечной осей, проходящих через ее центр тяжести;
$S_0 - s$ — площадь поврежденной ватерлинии;
α, β — координаты ЦТ этой площади;
v — объем затопленного отсека по первоначальную ватерлинию;
x, y, z — координаты центра тяжести объема v;
ΔI_x, ΔI_y — потерянные моменты инерции площади ватерлинии при затоплении отсека.

Прочие обозначения те же, что и в первом случае.

1) изменение средней осадки

$$\varepsilon = \frac{v}{S_0 - s}; \quad (259)$$

2) координаты ЦТ действующей ватерлинии при затоплении

$$\alpha = x_f - (a - x_f)\frac{s}{S_0 - s}; \quad (260)$$

$$\beta = -b\frac{s}{S_0 - s}; \quad (261)$$

3) потерянные моменты инерции

$$\Delta I_x = i_x + sb^2 + (S_0 - s)\beta^2; \quad (262)$$

$$\Delta I_y = i_y + s(a - x_f)^2 + (S_0 - s)(\alpha - x_f)^2; \quad (263)$$

4) изменение метацентрической высоты

$$\Delta h = \frac{v}{V}\left(T + \frac{\varepsilon}{2} - z - \frac{\Delta I_x}{v}\right); \quad (264)$$

$$\Delta H = -\frac{\Delta I_y}{V}; \quad (265)$$

5) угол крена в градусах

$$\theta = 57{,}3\,\frac{v(y - \beta)}{V(h + \Delta h)}; \quad (266)$$

6) угол диферента в радианах

$$\psi = \frac{v(x-\alpha)}{V(H+\Delta H)}; \quad (267)$$

7) изменение осадки носом и кормой

$$\left.\begin{aligned} \Delta T_{н} &= \varepsilon + \left(\frac{L}{2} - \alpha\right)\psi \\ \Delta T_{к} &= \varepsilon - \left(\frac{L}{2} + \alpha\right)\psi \end{aligned}\right\} \quad (268)$$

§ 47. ЗАТОПЛЕНИЕ ГРУППЫ ОТСЕКОВ И ТАБЛИЦЫ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

Увеличение среднего углубления:

$$\varepsilon = \frac{\sum v_i}{S_0 - \sum s_i}. \quad (269)$$

Абсцисса ЦТ поврежденной ватерлинии:

$$\alpha = x_f - \left(\frac{\sum s_i a_i}{\sum s_i} - x_f\right) \frac{\sum s_i}{S_0 - \sum s_i}. \quad (270)$$

Ордината ЦТ поврежденной ватерлинии:

$$\beta = -\frac{\sum s_i b_i}{S_0 - \sum s_i}. \quad (271)$$

Изменение поперечной метацентрической высоты:

$$\Delta h = \frac{1}{V}\left[\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right)\sum v_i - \sum v_i z_i - \sum i_i - \sum s_i b_i^2 - \left(S_0 - \sum s_i\right)\beta^2\right]. \quad (272)$$

Угол крена в градусах:

$$\theta = 57{,}3\,\frac{\sum v_i y_i - \beta \sum v_i}{V(h+\Delta h)}. \quad (273)$$

Изменение продольной метацентрической высоты:

$$\Delta H = -\frac{1}{V}\left[\sum i_y + \sum s_i (a_i - x_f)^2 + (S_0 - \sum s_i)(\alpha - x_f)^2\right]. \quad (274)$$

Угол диферента в радианах:

$$\psi = \frac{\sum v_i x_i - \alpha \sum v_i}{V(H+\Delta H)}. \quad (275)$$

Изменение углубления носом:

$$\Delta T_{н} = \varepsilon + \left(\frac{L}{2} - \alpha\right)\psi. \quad (276)$$

Изменение углубления кормой:

$$\Delta T_{\text{к}} = \varepsilon - \left(\frac{L}{2} + \alpha\right)\psi. \tag{277}$$

Диферент:

$$\Delta = \Delta T_{\text{н}} - \Delta T_{\text{к}}. \tag{278}$$

Практические схемы расчета по метацентрическим формулам приведены в § 53.

С помощью приведенных здесь формул для затопления единичных отсеков и группы их могут быть рассчитаны таблицы непотопляемости корабля.

Впервые таблицы непотопляемости были предложены акад. А. Н. Крыловым еще до русско-японской войны. Впоследствии они неоднократно видоизменялись как по своей форме, так и по содержанию. Ниже приводится в качестве примера один из вариантов таблиц непотопляемости.

Табл. 51 содержит данные об изменении посадки при затоплении единичного отсека и называется справочной таблицей непотопляемости. Она делится на четыре основных раздела. Раздел первый включает столбцы I—IV и содержит данные о положении отделений по длине корабля. Раздел второй включает столбцы V—XIII и содержит данные об элементах единичных отделений. Третий раздел содержит данные об изменении посадки и остойчивости корабля при затоплении единичных отделений и включает столбцы XIV—XX. Раздел четвертый, включающий столбцы XXI—XXV, содержит данные для суммирования при расчете случая группового затопления.

Табл. 52 содержит данные об изменении посадки и остойчивости от затопления группы отсеков для различных возможных случаев аварии. Кроме того, она содержит указания о способе выпрямления корабля при рассматриваемых случаях аварии путем намеренного затопления групп отсеков. Эта таблица предназначается для использования в боевой обстановке и потому называется боевой таблицей непотопляемости.

Боевая таблица непотопляемости состоит из левой и правой частей. В левую половину заносятся данные об изменении посадки и остойчивости корабля при затоплении на нем группы отделений в результате получения подводной пробоины. В правой части указывается, какие отделения должны быть намеренно затоплены для выравнивания корабля и восстановления его остойчивости. Кроме того, здесь же приводятся данные о суммарном изменении посадки и остойчивости корабля после его выравнивания.

Для облегчения ориентировки в боевой таблице варианты повреждения, помещающиеся в левой части таблицы, располагаются в ней в порядке возрастания крена, а для каждого интервала угла крена — в порядке возрастания диферента. Для каждого случая в левой части таблицы необходимо иметь несколько вариантов выравнивания в правой части.

Таблица 51

Справочная таблица непотопляемости

Шпангоуты, на которых расположены главные поперечные водонепроницаемые переборки, ограничивающие отсек	То же для отделения	Наименование отделений	№ отделений	Объем отделений v, $м^3$	Координаты ЦТ объема v			Потерянная площадь ватерлинии s, $м^2$	Координаты ЦТ площади s		Моменты инерции		Изменение осадки			Угол крена $\delta\theta$, град.	Угол дифферента $\delta\psi$, град.	Изменение поперечного коэффициента остойчивости $\delta(Dh)$, *тм*	Изменение поперечной МЦ высоты δh, *м*	Для суммирования				
					x, *м*	y, *м*	z, *м*		a, *м*	b, *м*	$i+sb^2$, $м^4$	$j+s(a-x_f)^2$, $м^4$	средней ε, *м*	носом $\delta T_н$, *м*	кормой $\delta T_к$, *м*					$vx = V : VI$, $м^4$	$vy = V \cdot VII$, $м^4$	$vz = V \cdot VIII$, $м^4$	$sa = IX \cdot X$, $м^3$	$sb = IX \cdot XI$, $м^3$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV

Боевая таблица непотопляемости составляется на основании данных справочной таблицы непотопляемости. В зависимости от вида применяемых таблиц непотопляемости несколько видоизменяются и расчетные формулы для случая группового затопления отсеков.

Таблица 52

Боевая таблица непотопляемости

Результат затопления от пробоины

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
№ задач	Угол крена $\theta°$	Угол диферента ψ	Место пробоины	№ шпангоутов затопленных отделений	Наименование отделений, затопленных при пробоине	№ отделений	Объем v, $м^3$	Увеличение среднего углубления ε, $см$	Изменение носового углубления Δ_1, $см$	Изменение кормового углубления Δ_2, $см$	Изменение метацентрической высоты Δh, $см$
				6—11	Балластная систерна	1—20					
1	0°	0°7′	6—14	11—14	Погреб	1—30	271,5	5,0	39,0	—21,2	2,3
				6—14	Малярная	1—20					
				6—14	Шкиперская	1—20					

Суммарный результат от пробоины и от затопления отделений для выравнивания крена и диферента

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
№ задач	№ варианта	№ шпангоутов затопляемых отделений	Наименование отделений, затопленных для выравнивания крена и диферента	№ отделений	Общее количество воды, принятое кораблем v, $м^3$	Увеличение среднего углубления ε, $см$	Изменение носового углубления Δ_1, $см$	Изменение кормового углубления Δ_2, $см$	Изменение метацентрической высоты Δh, $см$	Угол крена θ
		125—130	Кормовой отсек	IV 30						
1	1	126—130	Турбинная выгородка	IV 40	513	14,0	14,0	14,1	1	0°
2										

Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

шает метацентрическую высоту.

3. Затапливаемые отделения должны находиться на противоположном борту и на противоположной оконечности по отношению к местоположению пробоины.

4. Вес принимаемой воды должен быть минимальным.

	I	Шпангоуты, на которых расположены главные поперечные водонепроницаемые переборки, ограничивающие отсек
	II	То же для отделения

	XXIV	$sa = IX \cdot X$, $м^3$	овления
	XXV	$sb = IX \cdot XI$, $м^3$	

Боевая таблица непотопляемости составляется на основании данных справочной таблицы непотопляемости. В зависимости от вида применяемых таблиц непотопляемости несколько видоизменяются и расчетные формулы для случая группового затопления отсеков. Однако по существу они всегда мало отличаются от формул, приводимых в настоящем параграфе.

Таблица 53

Вспомогательная таблица

Задача № Вариант выравнивания №

№ отделений	Наименование отделений и их расположение	Объемы отделений v, $м^3$	Моменты объемов			Потерянная площадь ватерлинии s, $м^2$	Статические моменты площади		Моменты инерции	
			vx, $м^4$	vy, $м^4$	vz, $м^4$		sa, $м^3$	sb, $м^3$	$i+sb^2$, $м^4$	$j+s(a-x_f)^2$, $м^4$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
	Суммы	$\sum_1$	$\sum_2$	$\sum_3$	$\sum_4$	$\sum_5$	$\sum_6$	$\sum_7$	$\sum_8$	$\sum_9$

Расчет вариантов затопления в боевой таблице производится на особом бланке, называемом вспомогательной таблицей. Примерная форма вспомогательной таблицы приведена в табл. 53. При выборе отделений, подлежащих затоплению для выравнивания крена и дифферента, необходимо руководствоваться следующими соображениями.

1. Затапливаемые отделения должны быть расположены в нижних частях корабля, так как прием груза внизу увеличивает остойчивость.

2. Затапливаемые отделения должны заполняться водой доверху, ибо наличие свободных поверхностей жидкости в отсеках уменьшает метацентрическую высоту.

3. Затапливаемые отделения должны находиться на противоположном борту и на противоположной оконечности по отношению к местоположению пробоины.

4. Вес принимаемой воды должен быть минимальным.

§ 48. ДИАГРАММА ПЕРЕУГЛУБЛЕНИЯ И. Г. БУБНОВА

Если корабль не имеет водонепроницаемых продольных переборок, изменение посадки его при затоплении отсека может быть приближенно получено с помощью диаграммы переуглубления (рис. 69), предложенной И. Г. Бубновым.

По оси абсцисс диаграммы переуглубления откладывается в принятом масштабе длина корабля, а по оси ординат — изменения осадки N, M, ε.

Здесь ε — изменение средней осадки при затоплении отсека, простирающегося от кормового перпендикуляра до сечения с абсциссой x:

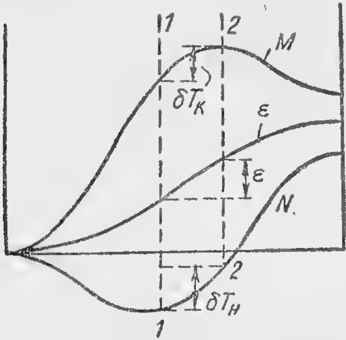


Рис. 69.

$$\varepsilon = \frac{1}{S} \int_{-L_к}^{x} \omega \, dx; \qquad (279)$$

N — изменение осадки носом при затоплении того же отсека

$$N = \varepsilon + \frac{L_н}{I_{yf}} \int_{-L_к}^{x} (x - x_f) \, \omega \, dx; \qquad (280)$$

M — изменение осадки кормой при затоплении того же отсека

$$M = \varepsilon - \frac{L_к}{I_{yf}} \int_{-L_к}^{x} (x - x_f) \, \omega \, dx, \qquad (281)$$

где S — площадь грузовой ватерлинии;

ω — площадь погруженной части шпангоута;

x_f — абсцисса ЦТ площади ватерлинии;

$L_н = \frac{L}{2} - x_f$ — длина носовой оконечности;

$L_к = \frac{L}{2} + x_f$ — длина кормовой оконечности;

I_{yf} — момент инерции площади ватерлинии относительно центральной поперечной оси.

Схема вычисления величин ε, M, N приведена в табл. 54. При вычислении их не учитывается влияние свободной поверхности воды и сделано допущение о прямостенности обводов выше грузовой. Затопляемый отсек предполагается закрытым сверху на уровне грузовой ватерлинии.

При затоплении отсека, ограниченного переборками $1-1$ и $2-2$, изменение осадки носом определится разностью ординат

$$\Delta T_н = N_2 - N_1. \qquad (282)$$

Изменение осадки кормой:

$$\Delta T_к = M_2 - M_1. \qquad (283)$$

Изменение средней осадки:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1. \tag{284}$$

Диаграмма И. Г. Бубнова дает достаточно надежные результаты, если затопляемые отсеки невелики, так как при построении ее не учитывается влияние свободной поверхности воды в отсеке и потерянной площади ватерлинии. Неточность эта частично компенсируется предположением о полной пустоте затопляемого отсека.

Таблица 54

Схема вычисления диаграммы переуглубления

№ шпангоутов	Площадь шпангоутов, ω	$\sum$ II попарно	$\sum$ III сверху	$\varepsilon = \text{IV}\,\frac{\Delta L}{2S}$	I×II	$\sum$ VI попарно	$\sum$ VII сверху	$\text{VIII}\left(\frac{\Delta L}{2}\right)^2$	$x_f SV$	IX — X	$\text{XI}\,\frac{L_н}{I_{yf}}$	$N = \text{V} + \text{XII}$	$\text{XI}\cdot\frac{L_к}{I_{yf}}$	$M = \text{V} - \text{XIV}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
—10														
— 9														
:														
— 1														
0														
1														
2														
:														
9														
10														

При необходимости более точного результата изменение осадок носом и кормой может быть определено по следующим формулам.

Изменение осадки носом

$$\Delta T_н = \frac{v}{S - s} + \frac{vx - v\alpha}{I_{yf} - \Delta I_y}\left(\frac{L}{2} - \alpha\right). \tag{285}$$

Изменение осадки кормой

$$\Delta T_к = \frac{v}{S - s} - \frac{vx - v\alpha}{I_{yf} - \Delta I_y}\left(\frac{L}{2} + \alpha\right), \tag{286}$$

где s — потерянная площадь ватерлинии; ΔI_y — потерянный момент инерции, определяемый по формуле (263); α — абсцисса центра тяжести площади действующей ватерлинии, определяемая по формуле (260).

Величины v и vx могут быть вычислены по формулам

$$v = S\varepsilon,$$

$$vx = \frac{\Delta T_{\text{н}} - \varepsilon}{\frac{1}{2} L - x_f} I_{yf},$$

где $\Delta T_{\text{н}}$ и ε берутся по данным расчета первого приближения по формулам (282) и (284).

§ 49. РАСЧЕТ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ ПО СПОСОБУ С. Н. БЛАГОВЕЩЕНСКОГО

Расчет непотопляемости по способу С. Н. Благовещенского применим в случае затопления на корабле отсеков, симметричных относительно диаметральной плоскости и простирающихся от борта до борта. В основу способа положены следующие допущения:

1. Судно и отсек в пределах изменения посадки предполагаются прямостенными.

2. Абсциссы центров тяжести утраченных площадей s ватерлиний предполагаются равными абсциссам центров тяжести затопляемых объемов.

3. Влияние собственных продольных моментов инерции свободных поверхностей s при затоплении любого отсека или группы их уменьшает коэффициент DH продольной остойчивости в отношении $\frac{1}{1{,}02}$.

По поводу характера аварии предполагается, что затопленные отсеки открыты сверху и сообщаются через пробоину с забортной водой.

Для выполнения расчетов необходимо иметь следующие материалы:

1. Схему расположения переборок, позволяющую установить длины затопляемых отсеков и их расположение по длине судна.

2. Расчет начальной остойчивости и дифферента неповрежденного судна.

3. Строевую по шпангоутам для осадки, соответствующей начальному водоизмещению.

4. Начальную ватерлинию.

5. Корпус теоретического чертежа.

Строевая по шпангоутам (кривая ω) вычерчивается по масштабу Бонжана с учетом начального дифферента.

Начальная ватерлиния (кривая y) вычерчивается в искаженном масштабе, т. е. масштаб длины выбирается меньшим, чем масштаб ширины.

Обе кривые строятся на совмещенном графике, причем масштабы абсцисс и ординат рекомендуется выбирать таким образом, чтобы график мог поместиться в стандартном расчетном формате 203×288. На этот же график следует нанести кривую ординат центров

тяжести погруженных площадей шпангоутов. Положения центров тяжести могут быть определены путем вырезывания из плотной бумаги фигур, ограниченных контуром соответствующих шпангоутов и начальной ватерлинией, и подвешивания их.

На построенных кривых наносятся ординаты, соответствующие положениям водонепроницаемых переборок, ограничивающих затапливаемые отсеки.

Для получения элементов утраченной площади ватерлинии и объема отсека с практически достаточной точностью можно участки кривых ω и y, ограниченные переборками, заменить прямыми, как

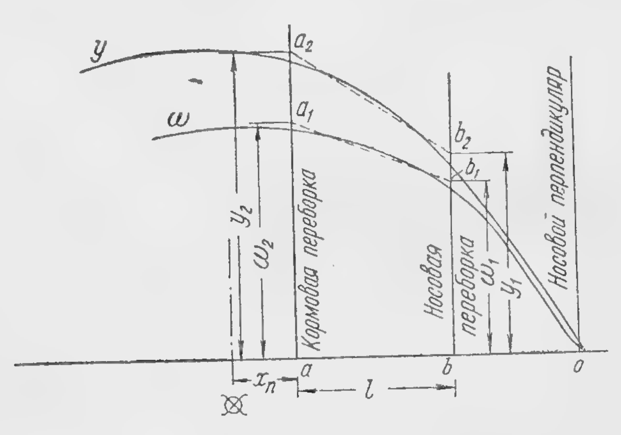


Рис. 70.

это показано на рис. 70. Прямая проводится на-глаз с таким расчетом, чтобы площадь образуемой ею трапеции была равновелика площади кривой и чтобы центр тяжести по длине совпадал с центром тяжести площади участка кривой. Последнее достигается с достаточной степенью точности, если наклон приблизительно равен среднему наклону кривой. При такой замене площадей кривых площадями трапеций объем отсека и его статический момент относительно миделя могут быть вычислены как площадь и статический момент площади трапеции abb_1a_1, а элементы утраченной площади — как элементы трапеции abb_2a_2. Расчетные формулы для элементов отсека по начальную ватерлинию представятся в следующем виде.

Объем отсека:

$$v = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} l\varkappa. \tag{287}$$

Абсцисса ЦТ объема отсека от миделя:

$$x = \frac{2\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \frac{l}{3} + x_{\text{п}}. \tag{288}$$

Утраченная площадь ватерлинии:

$$s = (y_1 + y_2) l\varkappa, \tag{289}$$

Поперечный момент инерции утраченной площади ватерлинии:

$$i=(y_1^2+y_2^2)(y_1+y_2)\frac{l}{6}\varkappa, \tag{290}$$

где l — длина между водонепроницаемыми переборками, ограничивающими отсек с носа и кормы;

ω_1 — приведенная площадь погруженной по начальную ватерлинию части носовой переборки отсека (отрезок bb_1 на рис. 70);

ω_2 — приведенная площадь погруженной части кормовой переборки отсека (отрезок aa_1);

$x_п$ — отстояние кормовой переборки отсека от миделя. Если переборка расположена в корму от миделя, $x_п$ входит в формулу со знаком минус;

y_1 — приведенная ордината начальной ватерлинии у носовой переборки отсека (отрезок bb_2 на рис. 70);

y_2 — приведенная ордината начальной ватерлинии у кормовой переборки отсека (отрезок aa_2);

$\varkappa$ — коэффициент проницаемости отсека (см. § 53).

Изложенный метод определения элементов отсеков разработан инж. В. А. Уманцем. Схема расчета приведена в табл. 55.

Для определения объема влившейся в отсек воды и аварийных осадок носом и кормой строится вспомогательный график изменения осадок при затоплении условного отсека постоянного объема в зависимости от положения ЦТ этого отсека по длине корабля. Рекомендуется принимать следующие постоянные объемы:

Для катера водоизмещением до 20 *т*	1 *м*³
Для судна водоизмещением от 20 до 200 *т*	10 *м*³
Для судна водоизмещением от 200 до 2000 *т*	100 *м*³
Для судна водоизмещением более 2000 *т*	1000 *м*³

На графике строятся три кривые:

1. Кривая изменения осадки носом $\varepsilon_н$.
2. Кривая изменения осадки кормой $\varepsilon_к$.
3. Кривая изменения осадки при ЦТ затопляемого отсека ε_v.

Две первые кривые линейно зависят от абсциссы ЦТ условного отсека и представляют прямые линии. Поэтому для их построения достаточно вычислить и нанести на график для каждой из них две крайние ординаты и соединить полученные на графике точки по линейке. Третья кривая является параболой второй степени. График показан на рис. 71.

Крайние ординаты кривой $\varepsilon_н$ вычисляются по следующим формулам:

1. Изменение осадки носом при положении ЦТ условного отсека на носовом перпендикуляре:

$$\varepsilon_{нн}=A+BC. \tag{291}$$

Таблица 55

Элементы затапливаемых отсеков

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Район расположения	Длина отсека l	Площади переборок		Абсцисса кормовой переборки $x_п$	Теоретический объем отсека $v' = \frac{\omega_1+\omega_2}{2} l = \frac{III+IV}{2} II$	Коэффициент проницаемости $\varkappa$	Расчетный объем отсека $v = v'\varkappa = VI \cdot VII$	Абсцисса ЦТ $x = \frac{2\omega_1+\omega_2}{\omega_1+\omega_2}\frac{l}{3} + x_п = \frac{2III+IV}{III+IV}\frac{II}{3} + V$	Ордината ЦТ объема отсека z_v	Ординаты ВЛ на переборке		Утраченная площадь ВЛ $s = (y_1+y_2) l\varkappa = (XI+XII) \cdot II \cdot VII$	Момент инерции площади s $i = (y_1^2+y_2^2)(y_1+y_2)\frac{l}{6}\varkappa = (XI^2+XII^2)\frac{XIII}{6}$
		носовой ω_1	кормовой ω_2							носовой y_1	кормовой y_2		
шп.	$м$	$м^2$	$м^2$	$м$	$м^3$	—	$м^3$	$м$	$м$	$м$	$м$	$м^2$	$м^4$

2. Изменение осадки носом при положении ЦТ условного отсека на кормовом перпендикуляре:

$$\varepsilon_{нк} = A - BE, \tag{292}$$

где обозначено:

$$A = \frac{10}{S}; \quad C = \left(\frac{L}{2} - x_f\right)^2; \tag{293}$$

$$B = \frac{10{,}2}{VH}; \tag{294}$$

$$E = \left(\frac{L}{2}\right)^2 - x_f^2; \tag{295}$$

здесь L, V, S, x_f и H соответственно длина между перпендикулярами, начальное водоизмещение, площадь ватерлинии, абсцисса ЦТ ее и продольная метацентрическая высота при начальном положении.

Вычисление крайних ординат кривой $\varepsilon_к$ производится по формулам:

1. Изменение осадки кормой при положении ЦТ условного отсека на кормовом перпендикуляре

$$\varepsilon_{кк} = A + BD. \qquad (296)$$

2. Изменение осадки кормой при положении ЦТ условного отсека на носовом перпендикуляре

$$\varepsilon_{кн} = \varepsilon_{нк} = A - BE, \qquad (297)$$

где

$$D = \left(\frac{L}{2} + x_f\right)^2. \qquad (298)$$

Прочие обозначения те же.

В этих формулах объем условного отсека принят равным 10 $м^3$. При иной величине условного отсека числители формул для A и B должны соответственно измениться.

График строится следующим способом: на горизонтальной оси отмечается положение миделя и в обе стороны от него в выбранном (мелком) масштабе откладываются величины $\frac{L}{2}$, из концов которых восстанавливаются носовой и кормовой (влево) перпендикуляры. На перпендикулярах наносятся в масштабе бо́льшем, чем для длины, шкалы изменения осадок в метрах вверх от оси абсцисс положительные, вниз — отрицательные. На носовом перпендикуляре откладывается вверх величина $\varepsilon_{нн}$, на кормовом вниз $\varepsilon_{нк}$. Ординаты прямой, соединяющей концы отложенных отрезков, определяют величины $\varepsilon_н$.

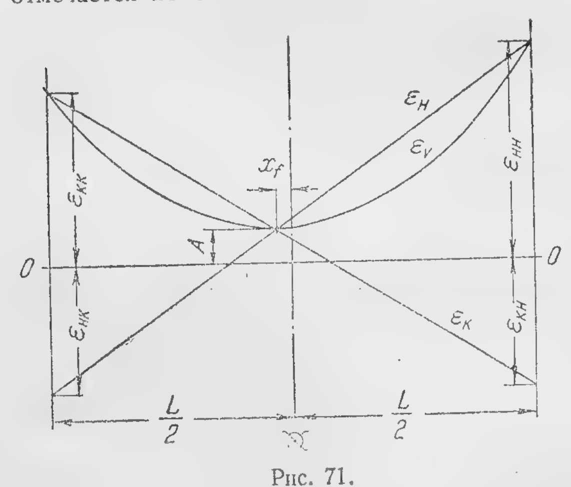


Рис. 71.

Для вычерчивания кривой $\varepsilon_к$ откладываются на кормовом перпендикуляре вверх $\varepsilon_{кк}$ и на носовом вниз $\varepsilon_{кн} = \varepsilon_{нк}$. Полученные точки соединяются прямой. Точка пересечения прямых $\varepsilon_н$ и $\varepsilon_к$ должна отстоять от миделя на расстояние x_f, а от оси абсцисс на расстояние A. Невыполнение этого условия указывает на наличие ошибки в вычислениях.

Построение прямых $\varepsilon_н$ и $\varepsilon_к$ дает 4 точки для вычерчивания параболы ε_v: конец ординаты $\varepsilon_{нн}$, конец ординаты $\varepsilon_{кк}$, точку пересечения прямых $\varepsilon_н$ и $\varepsilon_к$, являющуюся вершиной параболы, и точку, симметричную концу ординаты $\varepsilon_{кк}$ (если $x_f < 0$). Последняя точка откладывается на расстоянии $\varepsilon_{кк}$ от оси абсцисс и $2x_f$ от носового перпендикуляра. Если $x_f > 0$, то строится точка, симметричная $\varepsilon_{нн}$, на расстоянии $2x_f$ от кормового перпендикуляра. Осью симметрии параболы является вертикаль, проходящая через точку пересечения всех трех кривых. В дополнение к указанным четырем точкам вычисляется ордината еще двух симметричных точек при абсциссе $x - x_f$, откладываемой от оси параболы и принимаемой равной круглому числу, равному приблизительно $0{,}4\frac{L}{2} \div 0{,}5\frac{L}{2}$; ордината вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_v = A + B(x - x_f)^2 \qquad (299)$$

и откладывается вверх от оси абсцисс на расстоянии $x - x_f$ по обе стороны оси параболы. Все точки соединяются плавной кривой по лекалу так, чтобы касательная к параболе в точке пересечения была горизонтальна.

Дальнейший расчет производится в табл. 56. Данные отсеков переписываются из табл. 55. Данные графиков снимаются со вспомогательного графика в зависимости от абсциссы его ЦТ. Полный объем затопляемого отсека по аварийную ватерлинию вычисляется по формуле:

$$v_1 = \frac{v}{1 - \frac{s\varepsilon_v}{10}}. \qquad (300)$$

Изменения осадки носом $\Delta T_н$ и кормой $\Delta T_к$ получаются умножением величин $\varepsilon_н$ и $\varepsilon_к$ на отношения полного объема v_1 отсека к объему условного отсека. Если условный объем принимается отличным от 10, знаменатель в формуле (300) должен соответственно измениться.

Вычисление аварийной поперечной метацентрической высоты в конечный момент затопления производится по обычным для метода постоянного водоизмещения формулам теории корабля (§ 46) и порядок его указан в табл. 56. Результаты расчета полезно представить графически в виде схематического чертежа положений поврежденного корабля.

Если расчет производится для одновременного затопления двух или более отсеков, в табл. 56 в столбцах, содержащих элементы отсеков, приводятся данные, относящиеся к затопляемой группе отсеков, которые предварительно должны быть сосчитаны отдельно.

Точность способа Благовещенского практически равна точности расчета по метацентрическим формулам, описанного в § 46.

Таблица 56

Расчет посадки поврежденного судна по аварийную ватерлинию и вычисление аварийной остойчивости

$V =$ $T =$ $S =$ $h =$ $Vh =$

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
Данные отсеков						Данные графиков			Вычисление аварийной посадки					Вычисление аварийной остойчивости						
												Осадка								
район расположения отсеков	утраченная площадь s	момент инерции утраченной площади i	затопленный объем v	абсцисса ЦТ затопленного объема x_v	ордината ЦТ затопленного объема z_v	$\varepsilon_н$	$\varepsilon_к$	ε_v	$v_1 = \frac{v}{1 - \frac{S\varepsilon_v}{10}} = \frac{IV}{1 - \frac{II \cdot IX}{10}}$	$\Delta T_н = \frac{\varepsilon_н v_1}{10} = \frac{VII \cdot X}{10}$	$\Delta T_к = \frac{\varepsilon_к v_1}{10} = \frac{VIII \cdot X}{10}$	$T_{нА} = T_н + \Delta T_н = T_н + XI$	$T_{кА} = T_к + \Delta T_к = T_к + XII$	$\frac{i}{v} = \frac{III}{IV}$	$\frac{\Delta T}{2} = \frac{v}{2(S-s)} = \frac{IV}{2(S-II)}$	$VI + XV - XVI$	$T - XVII$	$\Delta(Vh) = IV \cdot XVIII$	$Vh + XIX$	Аварийная поперечная метацентрическая высота $h_A = \frac{XX}{V}$
шп.	$м^2$	$м^4$	$м^3$	м	м	м	м	м	$м^3$	м	м	м	м	м	м	м	м	$м^4$	$м^4$	м

§ 50. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ ПО СПОСОБУ Ю. А. ШИМАНСКОГО

Уточненный расчет непотопляемости по методу проф. Ю. А. Шиманского может быть применен в случае затопления на корабле больших отсеков, при которых определение крена и диферента по метацентрическим формулам становится неточным.

При сохранении тех же обозначений, как и в § 46—47, величины, характеризующие изменение посадки, могут быть вычислены по следующим приближенным формулам, выведенным при допущении прямостенности судна и затопленного отсека между исходной и действующей ватерлинией, а также малости угла ψ.

Изменение осадки:

$$\varepsilon = \frac{1}{S}(v_0 - W_y \operatorname{tg}\psi + sb \operatorname{tg}\theta). \qquad (301)$$

Угол крена:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{v_0 y_0 + sb\varepsilon + sab \operatorname{tg}\psi (1 + \operatorname{tg}^2\theta)}{v_0(z_0 + \varepsilon) - V_0 a_0 - S\frac{\varepsilon^2}{2} + I_x\left(1 + \frac{1}{2}\operatorname{tg}^2\theta\right) + I_y \frac{\operatorname{tg}^2\psi}{2}} = \frac{A}{B}. \qquad (302)$$

Угол диферента:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{v_0 x_0 - W_y \varepsilon + sab \operatorname{tg}\theta}{I_y - V_0 a_0}, \qquad (303)$$

где

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= Z_g - z_c \\ W_y = S\alpha &= (S_0 - s)\left[x_f - (a - x_f)\frac{s}{S_0 - s}\right] \end{aligned}\right\} \qquad (304)$$

Вычисление по приближенным формулам величин ε, $\operatorname{tg}\theta$ и $\operatorname{tg}\psi$ следует производить методом последовательных приближений в следующем порядке:

1) полагая в выражении (301) $\operatorname{tg}\theta = 0$ и $\operatorname{tg}\psi = 0$, вычисляют в первом приближении ε_1;

2) полагая в выражении (303) $\operatorname{tg}\theta = 0$ и $\varepsilon = \varepsilon_1$, вычисляют первое приближение для $\operatorname{tg}\psi_1$;

3) подставляя в выражение (302) $\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\psi_1$, $\operatorname{tg}^2\theta = 0$ и $\varepsilon = \varepsilon_1$, вычисляют первое приближение $\operatorname{tg}\theta_1$.

Далее, после подстановки в выражение (301) значений $\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\psi_1$ и $\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}\theta_1$, вычисляется величина ε_2 во втором приближении. После подстановки в формулу (303) величин ε_2 и $\operatorname{tg}\theta_1$ вычисляют $\operatorname{tg}\psi_2$ во втором приближении, а по формуле (302), подставляя в нее значения ε_2, $\operatorname{tg}\psi_2$, $\operatorname{tg}^2\theta_1$, вычисляют второе приближение для крена $\operatorname{tg}\theta_2$.

В том же порядке могут быть получены дальнейшие приближения, пока разница между последующими значениями их не перестанет выходить за желаемые пределы точности.

Если затапливаемый отсек ограничен сверху водонепроницаемой палубой, лежащей ниже исходной ватерлинии, или если непроницаемая

палуба лежит выше исходной ватерлинии, но заранее известно, что после затопления она будет находиться ниже действующей ватерлинии, в формулах (301), (302) и (303) следует положить $s = 0$ и объем отсека v_0 считать до указанной палубы. Для этого случая расчетные формулы примут вид

$$\varepsilon = \frac{1}{S_0}(v_0 - W_{0y}\operatorname{tg}\psi); \tag{305}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{v_0 y_0}{v_0(z+\varepsilon) - V_0 a_0 - S_0\frac{\varepsilon^2}{2} + I_{0x}\left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2\theta}{2}\right) + I_{0y}\frac{\operatorname{tg}^2\psi}{2}}; \tag{306}$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{v_0 x_0 - w_{0y}\varepsilon}{I_{0y} - V_0 a_0}; \tag{307}$$

$$W_{0y} = S_0 x_f. \tag{308}$$

Для учета влияния непрямостенности обводов корабля на изменение посадки следует нанести на чертеж по найденным значениям θ,

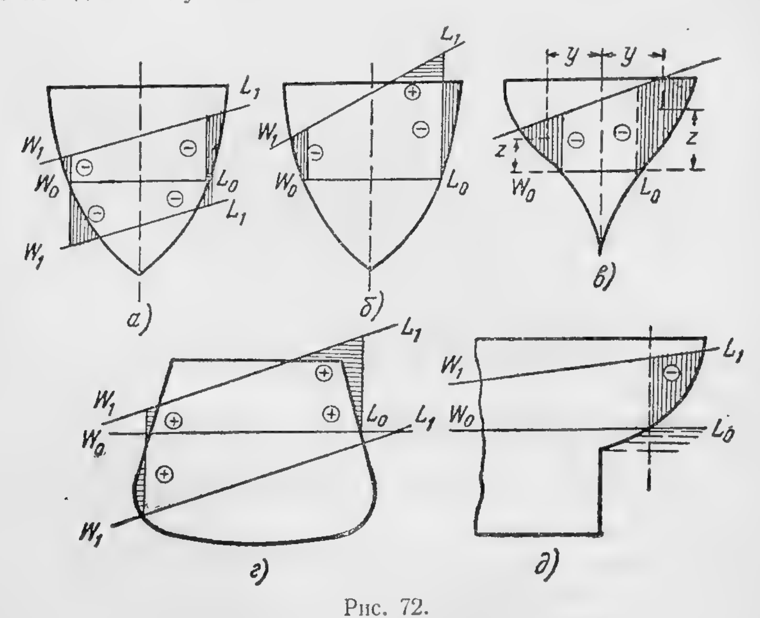


Рис. 72.

ψ и T новую ватерлинию, и на каждом шпангоуте засчитать те площадки, которые оказались незачтенными или, наоборот, излишне зачтенными при вычислении посадки по приближенным формулам, выведенным в предположении прямостенности корабля.

Для вычисления поправочного объема и координат его центра тяжести нужно проинтегрировать по длине корабля эти площадки и статические моменты их, приписав площадкам и координатам их ЦТ соответствующие знаки.

На рис. 72 показаны примеры таких площадок, причем заштрихованным вертикально приписывается знак минус, а заштрихованным горизонтально — знак плюс. К полученным таким образом объемам следует добавить с соответствующим знаком поправочные объемы в оконечностях корабля, находящиеся вне пределов длины его по исходную ватерлинию (рис. 72, *д*).

Для учета влияния непрямостенности обводов затопленного отсека выше исходной ватерлинии следует также отметить на чертеже излишне засчитанные или, наоборот, не засчитанные объемы и статические моменты их, приписав знак минус излишне засчитанным и плюс — не засчитанным (рис. 73).

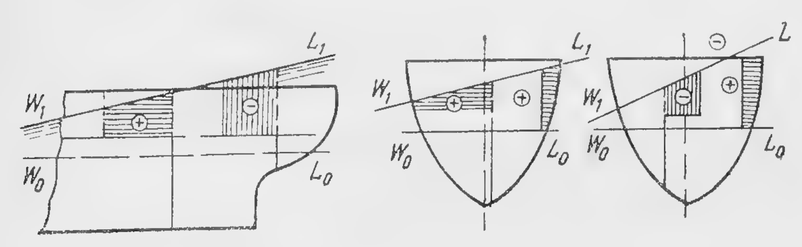


Рис. 73.

По рассчитанным площадкам вычисляется суммарный поправочный объем на непрямостенность обводов судна и отсека и координаты центра тяжести его. При этом суммарный поправочный объем

$$v = v_1 + v_2 + v_3, \tag{309}$$

где v_1 — суммарный объем от непрямостенности обводов шпангоутов и x_1, y_1, z_1 — координаты его ЦТ;

v_2 — суммарный объем от излишне засчитанных или не засчитанных объемов в оконечностях и x_2, y_2, z_2 — координаты ЦТ этого объема;

v_3 — суммарный объем, получившийся вследствие непрямостенности обводов отсека, и x_3, y_3, z_3 — координаты его ЦТ.

Координаты ЦТ суммарного поправочного объема определятся по формулам:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{v_1x_1 + v_2x_2 + v_3x_3}{v_1 + v_2 + v_3} \\ y &= \frac{v_1y_1 + v_2y_2 + v_3y_3}{v_1 + v_2 + v_3} \\ z &= \frac{v_1z_1 + v_2z_2 + v_3z_3}{v_1 + v_2 + v_3} \end{aligned}\right\} \tag{310}$$

Рассматривая суммарный поправочный объем v, как силу веса, если он имеет знак плюс, и силу поддержания, если он имеет знак минус, следует ввести в приближенные формулы величину объема v следующим образом.

Увеличение среднего углубления:

$$\varepsilon = \frac{1}{S}\left[(v + v_0) - W_y \operatorname{tg}\psi + sb \operatorname{tg}\theta\right]. \tag{311}$$

Изменение крена

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{(v_0 y_0 + vy) + sb\varepsilon + sab \operatorname{tg}\psi\,(1 + \operatorname{tg}^2\theta)}{v_0 (z_0 + \varepsilon) + v\,(z + \varepsilon) - V_0 a_0 - S\dfrac{\varepsilon^2}{2} + I_x\left(1 + \dfrac{\operatorname{tg}^2\theta}{2}\right) + I_y \dfrac{\operatorname{tg}^2\psi}{2}}. \tag{312}$$

Изменение диферента:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{(v_0 x_0 + vx) - W_y\varepsilon + sab \operatorname{tg}\theta}{I_y - V_0 a_0}. \tag{313}$$

Увеличение водоизмещения:

$$\delta V_1 = v_0 + v_1 + S\varepsilon + sb \operatorname{tg}\theta + sa \operatorname{tg}\psi. \tag{314}$$

Новое водоизмещение:

$$V_1 = V_0 + \delta V_1. \tag{315}$$

Если новые значения ε, $\operatorname{tg}\theta$ и $\operatorname{tg}\psi$ будут заметно отличаться от полученных ранее в предположении прямостенности обводов, следует повторить расчет заново, нанеся для этого на чертеж новую ватерлинию, соответствующую новой посадке.

Если получаемые таким способом величины ε, θ и ψ будут возрастать, то это укажет на то, что при рассматриваемом случае затопления корабль должен затонуть.

§ 51. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ ПО СПОСОБУ В. Г. ВЛАСОВА

При расчете посадки корабля с залитым отсеком по способу проф. В. Г. Власова, ход вычислений может быть разделен на две части. В первой части по формулам, точным для прямостенного корабля, определяется положение исходной ватерлинии, возможно более близкой к действительной ватерлинии [1].

Во второй части по формулам перехода определяются поправки к параметрам исходной ватерлинии и находится положение ватерлинии во втором приближении. При этом используются интегральные кривые ω, b, c (§ 15).

С л у ч а й 1. Затопление большого закрытого сверху и затопленного доверху отсека. Положение исходной ватерлинии определяется формулами, дающими с возрастающей точностью значения параметров θ и ψ, причем значения букв имеют тот же смысл, как и в пред-

[1] Определение параметров исходной ватерлинии может быть выполнено также с помощью метацентрических формул (§§ 46, 47).

шествовавших формулах, и индекс 0 относится к элементам неповрежденного корабля:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{v\,(x - x_{f_0})}{I_{yf_0} + m_0}\,, \tag{316}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{vy}{I_{x_0} + m_0}\,, \tag{317}$$

где

$$m_0 = \left(T_{\boxtimes 0} + \frac{1}{2}\,\frac{v}{S_0} - z\right) v - a_0 V_0, \tag{318}$$

$$z_{g_0} - z_{c_0} = a_0. \tag{319}$$

Далее

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{v\,(x - x_{f_0}) - \frac{1}{2}\, I_{yf_0} \operatorname{tg}^3 \psi_1}{I_{yf_0} + m_0 + \frac{1}{2}\, I_{x_0} \operatorname{tg}^2 \theta_1}\,, \tag{320}$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{vy}{I_{x_0} + m_0 + \frac{1}{2}\, I_{x_0} \operatorname{tg}^2 \theta_1 + \frac{1}{2}\, I_{yf_0} \frac{\operatorname{tg}^3 \psi_1}{\operatorname{tg} \psi_2}}\,, \tag{321}$$

$$\operatorname{tg} \psi_3 = \frac{v\,(x - x_{f_0}) - \frac{1}{2}\, I_{yf_0} \operatorname{tg}^3 \psi_2}{I_{yf_0} + m_0 + \frac{1}{2}\, I_{x_0} \operatorname{tg}^2 \theta_2}\,, \tag{322}$$

$$\operatorname{tg} \theta_3 = \frac{vy}{I_{x_0} + m_0 + \frac{1}{2}\, I_{x_0} \operatorname{tg}^2 \theta_2 + \frac{1}{2}\, I_{yf_0} \frac{\operatorname{tg}^3 \psi_2}{\operatorname{tg} \psi_3}}\,. \tag{323}$$

Третий параметр исходной ватерлинии W_1L_1 определится по формуле:

$$T_{\boxtimes 1} = T_{\boxtimes 0} + \frac{v}{S_0} - x_{f_0} \operatorname{tg} \psi_1, \tag{324}$$

где ψ_1 — окончательное значение параметра ψ, вычисленное по формулам (316—322).

Ватерлиния W_1L_1 наносится на чертеж теоретического корпуса корабля с построенными на нем интегральными кривыми.

С помощью этих кривых находятся водоизмещение V_1 по исходную ватерлинию, координаты ЦВ X_1, Y_1, Z_1 и элементы площади проекции ватерлинии W_1L_1 на основную плоскость. Вычисление элементов судна по ватерлинию W_1L_1 производится[1] по табл. 57.

Далее вычисляются следующие величины:

$$\delta v_1 = V_0 + v - V_1, \tag{325}$$

$$\mu_{yz_1} = X_0 V_0 + xv - X_1 V_1 - x_{f_1} \delta v_1, \tag{326}$$

[1] См. также § 15.

$$\mu_{xz_1} = Y_0 V_0 + vy - Y_1 V_1 - y_{f_1} \delta v_1, \tag{327}$$

$$\mu_{xy_1} = Z_0 V_0 + vz - Z_1 V_1 - z_{f_1} \delta v_1, \tag{328}$$

$$z_{f_1} = T_{\boxtimes 1} + x_{f_1} \operatorname{tg} \psi_1 + y_{f_1} \operatorname{tg} \theta_1, \tag{329}$$

$$D_1 = I_{yf_1} \operatorname{tg} \psi_1 \operatorname{tg} \theta_1 + I_{xy_1} (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_1), \tag{330}$$

$$E_1 = I_{x_1} (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_1) + I_{xy_1} \operatorname{tg} \psi_1 \operatorname{tg} \theta_1 - \mu_{xy_1}, \tag{331}$$

$$F_1 = \mu_{xz_1} + \mu_{xy_1} \operatorname{tg} \theta, \tag{332}$$

$$H_1 = I_{yf_1} (1 + \operatorname{tg}^2 \psi_1) + I_{xy_1} \operatorname{tg} \psi_1 \operatorname{tg} \theta_1 - \mu_{xy_1}, \tag{333}$$

$$Q_1 = I_{xy_1} (1 + \operatorname{tg}^2 \psi_1) + I_{x_1} \operatorname{tg} \psi_1 \operatorname{tg} \theta_1, \tag{334}$$

$$T_1 = \mu_{yz_1} + \mu_{xy_1} \operatorname{tg} \psi_1. \tag{335}$$

По полученным величинам составляются уравнения:

$$D_1 \frac{\delta\psi_2}{\cos^2 \psi_1} + E_1 \frac{\delta\theta_2}{\cos^2 \theta_1} = F_1, \tag{336}$$

$$H_1 \frac{\delta\psi_2}{\cos^2 \psi_1} + Q_1 \frac{\delta\theta_2}{\cos^2 \theta_1} = T_1. \tag{337}$$

Решая уравнения (336) и (337) относительно $\frac{\delta\psi_2}{\cos^2 \psi_1}$ и $\frac{\delta\theta_2}{\cos^2 \theta_1}$, находят поправки к параметрам исходной ватерлинии; параметры ватерлинии W_2L_2 второго приближения определятся формулами:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \operatorname{tg} \psi_1 + \frac{\delta\psi_2}{\cos^2 \psi_1}, \tag{338}$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \operatorname{tg} \theta_1 + \frac{\delta\theta_2}{\cos^2 \theta_1}. \tag{339}$$

Третий параметр вычисляется по формулам:

$$T_{\boxtimes 2} = T_{\boxtimes 1} + \delta T_{\boxtimes 2}, \tag{340}$$

$$\delta T_{\boxtimes 2} = \frac{\delta v_1}{S_1} - x_{f_1} \frac{\delta\psi_2}{\cos^2 \psi_1} - y_{f_1} \frac{\delta\theta_2}{\cos^2 \theta_1}. \tag{341}$$

Если поправки $\delta\psi_2$, $\delta\theta_2$, $\delta T_{\boxtimes 2}$ достаточно малы и при переходе от ватерлинии W_1L_1 к ватерлинии W_2L_2 обводы судна не претерпевают резких изменений, на полученном приближении можно остановиться. В противном случае следует приступить к третьему приближению, приняв ватерлинию W_2L_2 за исходную, нанеся ее на чертеж корпуса и повторив весь процесс вычислений.

В заключение приводим табл. 57 и относящиеся к ней формулы (342)—(354), по которым вычисляются элементы судна по произвольно заданным параметрам $T_{\boxtimes}$, θ, ψ.

Водоизмещение:

$$V_1 = \frac{L}{9} \left(\sum\nolimits_6 - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta \sum\nolimits_4 \right). \tag{342}$$

Таблица 57

Вычисление элементов объема, отсекаемого ватерлинией W_1L_1 и элементов проекции ее на плоскость XOY

№ шпангоутов	Абсциссы шпангоутов x_i	Ординаты правой ветви y_i	Ординаты левой ветви y_i'	y_i+y_i'	$x_i(y_i+y_i')$	$x_i^2(y_i+y_i')$	y_i^2	$y_i'^2$	$y_i^2-y_i'^2$	$x_i(y_i^2-y_i'^2)$	ω_i	ω_i'	$\omega_i+\omega_i'$	$x_i(\omega_i+\omega_i')$	y_i^3	$y_i'^3$	b_i	b_i'	c_i	c_i'
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
Суммы столбцов		—	Σ_1	Σ_2	Σ_3	—	—	Σ_4	Σ_5	—	—	Σ_6	Σ_7	Σ_8	Σ_9	Σ_{10}	Σ_{11}	Σ_{12}	Σ_{13}	

Момент водоизмещения относительно плоскости мидель-шпангоута:

$$M_{yz}=\frac{L}{9}\left(\sum\nolimits_{7}-\frac{1}{2}\operatorname{tg}\theta\sum\nolimits_{5}\right)=X_1V_1. \tag{343}$$

Момент водоизмещения относительно диаметральной плоскости:

$$M_{xz}=\frac{L}{9}\left[\sum\nolimits_{10}-\sum\nolimits_{11}-\frac{1}{6}\operatorname{tg}\theta\left(\sum\nolimits_{8}+\sum\nolimits_{9}\right)\right]=Y_1V_1. \tag{344}$$

Момент водоизмещения относительно основной плоскости:

$$M_{xy}=\frac{L}{9}\left\{\sum\nolimits_{12}+\sum\nolimits_{13}-\operatorname{tg}\theta_1\left[\frac{T_{\otimes 1}}{2}\sum\nolimits_{4}+\frac{1}{2}\operatorname{tg}\psi_1\sum\nolimits_{5}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{1}{3}\operatorname{tg}\theta\left(\sum\nolimits_{8}+\sum\nolimits_{9}\right)\right]\right\}=Z_1V_1. \tag{345}$$

Площадь проекции ватерлинии на плоскость xoy:

$$S=\frac{L}{9}\sum\nolimits_{1}. \tag{346}$$

Статический момент этой площади относительно оси oy:

$$Sx_f=\frac{L}{9}\sum\nolimits_{2}. \tag{347}$$

Статический момент этой площади относительно оси ox:

$$Sy_f=\frac{L}{9}\,\frac{1}{2}\sum\nolimits_{4}. \tag{348}$$

Момент инерции этой площади относительно оси ox:

$$I'_{x_1}=\frac{L}{9}\,\frac{1}{3}\left(\sum\nolimits_{8}+\sum\nolimits_{9}\right).$$

Момент инерции этой площади относительно оси oy:

$$I'_y=\frac{L}{9}\sum\nolimits_{3}. \tag{350}$$

Центробежный момент инерции этой площади относительно осей ox и oy:

$$I'_{xy}=\frac{L}{9}\,\frac{1}{2}\sum\nolimits_{5}. \tag{351}$$

Момент инерции той же площади относительно оси, проходящей ерез ее центр тяжести и параллельной оси oy:

$$I_{yf}=I'_y-Sx_f\frac{\sum_2}{\sum_1}. \tag{352}$$

Момент инерции той же площади относительно оси, проходящей через ее центр тяжести и параллельной оси ox:

$$I_x=I'_x-\frac{1}{2}Sy_f\frac{\sum_4}{\sum_1}. \qquad (35\ 3$$

Центробежный момент инерции этой площади относительно указанных центральных осей

$$I_{xy} = I'_{xy} - \frac{1}{2} S x_f \frac{\sum_4}{\sum_1}. \tag{354}$$

Случай 2. Затопление большого отсека, сообщающегося с забортной водой и открытого сверху. Как и в первом случае, сначала ищут параметры исходной ватерлинии, пользуясь формулами для прямостенного судна и отсека [1]).

Площадь сечения отсека первоначальной ватерлинией обозначена через s_0, координаты ее ЦТ через λ_0 и q_0 и собственные центральные моменты инерции ее относительно осей, параллельных координатным, — через j_{x_0}, j_{y_0}, j_{xy_0}.

Площадь действующей первоначальной ватерлинии:

$$S'_0 = S_0 - s_0. \tag{355}$$

Статический момент площади S'_0 относительно оси oy:

$$S'_0\alpha = S_0 x_{f_0} - s_0\lambda_0. \tag{356}$$

Статический момент площади S'_0 относительно оси ox:

$$S'_0\beta = -s_0 q_0. \tag{357}$$

Момент инерции площади S'_0 относительно центральной оси, параллельной oy:

$$I'_{yf_0} = I_{yf_0} - j_{y_0} - \lambda_0^2 s_0 - \alpha^2 S'_0. \tag{358}$$

Момент инерции площади S'_0 относительно центральной оси, параллельной оси ox:

$$I'_{x_0} = I_{x_0} - j_{x_0} - s_0 q_0^2 - \beta^2 S'_0. \tag{359}$$

В целях получения менее громоздких формул вводится новая система координат $f'x'y'z'$, начало которой f' совпадает с центром тяжести площади действующей ватерлинии S'_0. Ось $f'z'$ направлена по нормали к ватерлинии, а оси $f'x'$ и $f'y'$ совпадают с главными осями инерции площади S'_0.

Центробежный момент инерции площади S'_0 относительно осей ox и oy:

$$I'_{xy_0} = -j_{xy_0} - \lambda_0 q_0 s_0 - \alpha\beta S'_0. \tag{360}$$

В целях получения менее громоздких расчетных формул рассматривается наклонение вокруг главных центральных осей инерции площади действующей ватерлинии.

---

[1]) Взамен формул (360—375) для определения параметров исходной ватерлинии могут быть применены метацентрические формулы § 46.

12 Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

Угол, составляемый главной продольной осью инерции $f'x'$ площади S_0' с осью ox,

$$\varepsilon = \frac{I'_{xy_0}}{I'_{yf_0} - I'_{x_0}}. \tag{361}$$

Главный момент инерции площади S_0' относительно этой оси:

$$I''_{f'x'} = I'_{x_0} - \varepsilon^2 (I'_{yf_0} - I'_{x_0}). \tag{362}$$

Главный центральный момент инерции площади S_0' относительно поперечной оси $f'y'$:

$$I''_{f'y'} = I'_{yf_0} + \varepsilon^2 (I'_{yf_0} - I'_{x_0}). \tag{363}$$

Координаты x_0' и y_0' центра тяжести объема v относительно координатных плоскостей $z'f'y'$ и $z'f'x'$:

$$x_0' = (x_0 - \alpha) + (y_0 - \beta)\,\varepsilon, \tag{364}$$

$$y_0' = -(x_0 - \alpha)\,\varepsilon + (y_0 - \beta). \tag{365}$$

Обозначая через m_0' величину

$$m_0' = \left(T_{\otimes_0} + \frac{1}{2}\frac{v_0}{S_0'} - z_0'\right) v_0 - a_0 V_0, \tag{366}$$

получим расчетные формулы, дающие с последовательно возрастающей точностью значения искомых параметров:

$$\operatorname{tg} \psi_1'' = \frac{v_0 x_0'}{I''_{f'y'} + m_0'}, \tag{367}$$

$$\operatorname{tg} \theta_1'' = \frac{v_0 y_0'}{I''_{f'x'} + m_0'}, \tag{368}$$

$$\operatorname{tg} \psi_2'' = \frac{v_0 x_0' - \frac{1}{2} I''_{f'y'} \operatorname{tg}^3 \psi_1''}{I''_{f'y'} + m_0' + \frac{1}{2} I''_{f'x'} \operatorname{tg}^2 \theta_1''}, \tag{369}$$

$$\operatorname{tg} \theta_2'' = \frac{v_0 y_0'}{I''_{f'y'} + m_0' + \frac{1}{2} I''_{f'x'} \operatorname{tg}^2 \theta_1'' + \frac{1}{2} I''_{f'y'} \frac{\operatorname{tg}^3 \psi_1''}{\operatorname{tg} \psi_2''}}, \tag{370}$$

$$\operatorname{tg} \psi_3'' = \frac{v_0 x_0' - \frac{1}{2} I''_{f'y'} \operatorname{tg}^3 \psi_2''}{I''_{f'y'} + m_0' + \frac{1}{2} I''_{f'x'} \operatorname{tg}^2 \theta_2''} \tag{371}$$

$$\operatorname{tg} \theta_3'' = \frac{v_0 y_0'}{I''_{f'x'} + m_0' + \frac{1}{2} I''_{f'x'} \operatorname{tg}^2 \theta_2'' + \frac{1}{2} I''_{f'y'} \frac{\operatorname{tg}^3 \psi_2''}{\operatorname{tg} \psi_3}}. \tag{372}$$

Параметры ψ'' и θ'' определяют наклонение судна вокруг главных осей инерции площади действующей ватерлинии. Для перехода к принятой ранее системе координат служат формулы:

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \operatorname{tg}\psi'' - \varepsilon \operatorname{tg}\theta'', \tag{373}$$

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \varepsilon \operatorname{tg}\psi'' + \operatorname{tg}\theta''. \tag{374}$$

Третий параметр исходной ватерлинии находится по формуле:

$$T_{\boxtimes 1} = T_{\boxtimes 0} + \delta T_{\boxtimes 1}, \tag{375}$$

где

$$\delta T_{\boxtimes 1} = \frac{v_0}{S'_0} - \alpha \operatorname{tg}\psi_1 - \beta \operatorname{tg}\theta_1. \tag{376}$$

По найденным параметрам наносится на чертеже корпуса ватерлиния W_1L_1 и по схеме табл. 57 производится расчет элементов погруженного объема и проекции на основную плоскость площади ватерлинии. Кроме того, находятся значения s_1 площади проекции свободной поверхности в затопленном отсеке, координаты центра тяжести ее λ_1 и q_1, моменты инерции ее площади j_{x_1}, j_{y_1}, j_{xy_1}, затопленный объем v_1 по исходную ватерлинию W_1L_1 и координаты центра тяжести его x_1 и y_1, считая, что координатные плоскости совпадают с основной плоскостью, плоскостью миделя и диаметральной.

Далее отыскиваются элементы площади действующей ватерлинии:

$$S'_1 = S_1 - s_1, \tag{377}$$

$$S'_1\alpha_1 = x_{f_1}S_1 - s_1\lambda_1, \tag{378}$$

$$S'_1\beta_1 = S_1 y_{f_1} - s_1 q_1, \tag{379}$$

$$I'_{yf_1} = I''_{y_1} - j_{y_1} - \lambda_1^2 s_1 - \alpha_1^2 S'_1, \tag{380}$$

$$I'_{x_1} = I''_{x_1} - j_{x_1} - q_1^2 s_1 - \beta_1^2 S'_1, \tag{381}$$

$$I'_{xy_1} = I''_{xy_1} - j_{xy_1} - \lambda_1 q_1 s_1 - \alpha_1\beta_1 S'_1, \tag{382}$$

где I''_{x_1}, I''_{y_1}, I''_{xy_1} представляют моменты инерции площади S_1 относительно следов пересечения ее координатными плоскостями xoz и yoz. После этого вычисляются вспомогательные величины:

$$\delta v_1 = V_0 + v_1 - V_1, \tag{383}$$

$$\mu'_{yz_1} = X_0V_0 + v_1x_1 - X_1V_1 - \alpha_1\delta v_1, \tag{384}$$

$$\mu'_{zx_1} = Y_0V_0 + v_1y_1 - Y_1V_1 - \beta_1\delta v_1, \tag{385}$$

$$\mu'_{xy_1} = Z_0V_0 + v_1z_1 - Z_1V_1 - Z'_{f_1}\delta v_1, \tag{386}$$

$$z'_{f_1} = T_{\boxtimes 1} + \alpha_1 \operatorname{tg}\psi_1 + \beta_1 \operatorname{tg}\theta, \tag{387}$$

$$D'_1 = I'_{yf_1}\operatorname{tg}\psi_1 \operatorname{tg}\theta_1 + I'_{xy_1}(1 + \operatorname{tg}^2\theta_1), \tag{388}$$

$$E_1' = I_{x_1}'(1 + \operatorname{tg}^2\theta_1) + I_{xy_1}' \operatorname{tg}\psi_1 \operatorname{tg}\theta_1 - \mu_{xy_1}', \tag{389}$$

$$F_1' = \mu_{xz_1}' + \mu_{xy_1}' \operatorname{tg}\theta_1, \tag{390}$$

$$H_1' = I_{yf_1}'(1 + \operatorname{tg}^2\psi_1) + I_{xy_1}' \operatorname{tg}\psi_1 \operatorname{tg}\theta_1 - \mu_{xy_1}', \tag{391}$$

$$Q_1' = I_{xy_1}'(1 + \operatorname{tg}^2\psi_1) + I_{x_1}' \operatorname{tg}\psi_1 \operatorname{tg}\theta_1, \tag{392}$$

$$T_1' = \mu_{yz_1}' + \mu_{xy_1}' \operatorname{tg}\psi_1. \tag{393}$$

Уравнения для определения поправок $\delta\psi_2$ и $\delta\theta_2$ имеют вид:

$$D_1' \frac{\delta\psi_2}{\cos^2\psi_1} + E_1' \frac{\delta\theta_2}{\cos^2\theta_1} = F_1', \tag{394}$$

$$H_1' \frac{\delta\psi_2}{\cos^2\psi_1} + Q_1' \frac{\delta\theta_2}{\cos^2\theta_1} = T_1'. \tag{395}$$

Решая уравнения (394) и (395) относительно $\frac{\delta\psi_2}{\cos^2\psi_1}$ и $\frac{\delta\theta_2}{\cos^2\theta_1}$, вычисляют уточненные значения параметров:

$$\operatorname{tg}\psi_2 = \operatorname{tg}\psi_1 + \frac{\delta\psi_2}{\cos^2\psi_1}, \tag{396}$$

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \operatorname{tg}\theta_1 + \frac{\delta\theta_2}{\cos^2\theta_1}, \tag{397}$$

$$T_{⊠_2} = T_{⊠_1} + \delta T_{⊠_2}, \tag{398}$$

где

$$\delta T_{⊠_2} = \frac{\delta v_1}{S_1'} - \alpha_1 \frac{\delta\psi_2}{\cos^2\psi_1} - \beta_1 \frac{\delta\theta_2}{\cos^2\theta_1}.$$

Нахождение в случае надобности ватерлинии третьего приближения можно выполнить тем же путем, приняв ватерлинию W_2L_2 за исходную. Обычно, однако, поправки $\delta\psi_2$, $\delta\theta_2$, $\delta T_{⊠_2}$ получаются малыми и надобности в расчете третьего приближения не возникает.

§ 52. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ ПО СПОСОБУ акад. А. Н. КРЫЛОВА[1)]

Задача уточненного расчета непотопляемости по способу акад. А. Н. Крылова состоит в определении положения равновесия корабля, имеющего пробоину, и проверке его остойчивости.

За координатные плоскости, неразрывно связанные с кораблем, приняты следующие:

1) диаметральная плоскость;

2) плоскость грузовой ватерлинии при прямом положении корабля, не имеющего повреждений (накрашенная грузовая);

3) плоскость мидель-шпангоута.

[1)] Обработка излагаемого способа А. Н. Крылова была произведена С. Н. Благовещенским. Формулы (417) и (419)—(421) предлагаются им же.

Эти плоскости соответственно обозначены:

$$xoz,\ xoy,\ yoz.$$

Начало координат лежит в точке пересечения всех трех плоскостей, положительная ось ox направлена в нос, положительная ось oy — к левому борту, положительная ось oz — вниз.

Соответственно этим осям приняты неизменные в пространстве оси

$$\Omega\xi,\ \Omega\eta,\ \Omega\zeta$$

координат такие, которые при прямом положении равновесия и покое неповрежденного корабля совпадают соответственно с осями ox, oy, oz. Плоскость $\xi\Omega\eta$, следовательно, всегда совпадает с плоскостью действующей ватерлинии, а ось $\Omega\zeta$ направлена вертикально вниз.

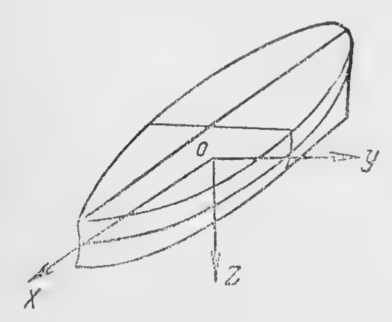


Рис. 74.

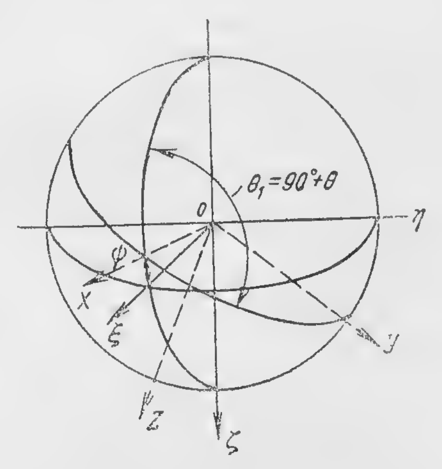


Рис. 75.

Положение корабля определяется координатой ζ_0 точки O и двумя эйлеровыми углами ψ и θ. Две другие координаты ξ_0 и η_0, соответствующие горизонтальным перемещениям, а также угол рыскания φ при исследовании непотопляемости могут быть приняты равными нулю. Система эйлеровых углов принята не „астрономическая“, а „корабельная“, т. е. та, которая введена акад. А. Н. Крыловым при исследовании качки корабля.

Расположение осей в корабле показано на рис. 74, а расположение эйлеровых углов — на рис. 75; угол $\psi = x\Omega\xi$ приблизительно равен углу диферента и измеряется в вертикальной плоскости $\xi\Omega\zeta$, соответствуя повороту вокруг оси $\Omega\eta$.

Положительное направление ψ отвечает диференту на корму (а не на нос, как обычно). Угол $\theta = \theta_1 - 90°$ приблизительно равен углу крена и измеряется в плоскости yoz мидель-шпангоута, соответствуя повороту вокруг оси ox. Положительное значение θ отвечает крену на левый (а не на правый) борт.

Связь между подвижными и неподвижными координатами устанавливается на основании таблицы косинусов:

	x	y	z
ξ	a_1	b_1	c_1
η	a_2	b_2	c_2
ζ	a_3	b_3	c_3

Все девять косинусов выражаются через эйлеровы углы следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned}
\cos(x, \xi) &= a_1 = \cos\psi \\
\cos(x, \eta) &= a_2 = 0 \\
\cos(x, \zeta) &= a_3 = -\sin\psi \\
\cos(y, \xi) &= b_1 = \sin\psi\sin\theta \\
\cos(y, \eta) &= b_2 = \cos\theta \\
\cos(y, \zeta) &= b_3 = \cos\psi\sin\theta \\
\cos(z, \xi) &= c_1 = \sin\psi\cos\theta \\
\cos(z, \eta) &= c_2 = -\sin\theta \\
\cos(z, \zeta) &= c_3 = \cos\psi\cos\theta
\end{aligned}\right\} \qquad (399)$$

Формулами перехода от подвижных координат к неподвижным, и наоборот, будут следующие:

$$\left.\begin{aligned}
\xi &= a_1 x + b_1 y + c_1 z \\
\eta &= a_2 x + b_2 y + c_2 z \\
\zeta &= a_3 x + b_3 y + c_3 z
\end{aligned}\right\} \qquad (400)$$

и

$$\left.\begin{aligned}
x &= a_1\xi + a_2\eta + a_3\zeta \\
y &= b_1\xi + b_2\eta + b_3\zeta \\
z &= c_1\xi + c_2\eta + c_3\zeta
\end{aligned}\right\} \qquad (401)$$

Выписанные здесь геометрические формулы являются основными при расчете по способу акад. А. Н. Крылова.

Все залитые водой отделения поврежденного корабля могут быть разбиты на два класса.

К первому классу относятся отделения, заполняющиеся доверху, количество воды в которых не изменяется при изменении посадки корабля.

Суммарный объем таких отделений обозначен через v_1, а координаты центра тяжести этого объема x_1, y_1, z_1, так что

$$v_1 = \sum v'_i; \quad x_1 = \frac{\sum v'_i x'_i}{\sum v'_i}; \quad y_1 = \frac{\sum v'_i y'_i}{\sum v'_i}; \quad z_1 = \frac{\sum v'_i z'_i}{\sum v'_i}. \qquad (402)$$

Вливающаяся в эти отделения вода рассматривается как принятый твердый груз.

Весовое водоизмещение судна с заполненными отсеками первой категории

$$D = \gamma (V_0 + v_1). \qquad (403)$$

Координаты центра тяжести корабля:

$$\left.\begin{aligned} X_g &= \frac{V_0 X_{g_0} + v_1 x_1}{V_0 + v_1} \\ Y_g &= \frac{v_1 y_1}{V_0 + v_1} \\ Z_g &= \frac{V_0 Z_{g_0} + v_1 z_1}{V_0 + v_1} \end{aligned}\right\} \qquad (404)$$

где V_0, X_{g_0}, Z_{g_0} — водоизмещение и координаты центра тяжести неповрежденного корабля.

Необходимо помнить, что координаты Z_{g_0}, z_1 и Z_g центров тяжести измеряются не от основной плоскости, как обычно, а от плоскости прямой ватерлинии неповрежденного корабля, причем значения их положительны, если они расположены ниже этой ватерлинии.

Отсеки второй категории имеют свободную поверхность, и количество влившейся в них при повреждении воды зависит от положения корабля.

Суммарный объем v_2 этих отсеков, расположенный ниже первоначальной грузовой ватерлинии, и координаты его центра тяжести определяются аналогичными формулами:

$$v_2 = \sum v''_i; \quad x_2 = \frac{\sum v''_i x''_i}{\sum v''_i}; \quad y_2 = \frac{\sum v''_i y''_i}{\sum v''_i}; \quad z_2 = \frac{\sum v''_i z''_i}{\sum v''_i}. \qquad (405)$$

Величины подводного объема корабля, расположенного ниже первоначальной грузовой, и координаты его центра тяжести:

$$\left.\begin{aligned} V_2 &= V_0 - v_2 \\ X'_c &= \frac{V_0 X_{c_0} - v_2 x_2}{V_0 - v_2} \\ Y'_c &= -\frac{v_2 y_2}{V_0 - v_2} \\ Z'_c &= \frac{V_0 Z_{c_0} - v_2 z_2}{V_0 - v_2} \end{aligned}\right\} \qquad (406)$$

Очевидно, что поврежденный корабль не будет в прямом положении равновесия, при котором

$$\zeta_0 = 0; \ \psi = 0; \ \theta = 0,$$

а погрузится по некоторую новую ватерлинию и примет такое положение, определяемое значениями ζ, ψ, θ, при котором войдет в воду добавочный объем U, обеспечивающий соблюдение двух условий равновесия корабля:

1) вес корабля должен быть равен силе поддержания

$$\gamma(V_0 + v_1) = \gamma(V_0 - v_2 + U) \tag{407}$$

или

$$U - (v_1 + v_2) = 0; \tag{I}$$

2) центр тяжести и центр величины корабля должны лежать на одной вертикали

$$\xi_c - \xi_g = 0, \tag{II}$$

$$\eta_c - \eta_g = 0. \tag{III}$$

Для определения точного значения величины ζ, ψ, θ необходимо сначала найти хотя бы грубое исходное приближение, а затем искать к нему последовательные поправки, которые с каждым приближением будут становиться все меньше и меньше.

Для определения весьма грубого исходного приближения акад. А. Н. Крылов рекомендует формулы:

$$\left.\begin{aligned}
\zeta_0 &= \frac{v_1 + v_2}{S} + x_f\psi_0 \\
\psi_0 &= \frac{(V_0 - v_2)X'_c - (V_0 + v_1)X_g + (v_1 + v_2)x_f}{I_{oy} - Sx_f^2 - (V_0 - v_2)Z'_c + (V_0 + v_1)Z_g} \\
\theta_0 &= \frac{(V_0 + v_1)Y_g - (V_0 - v_2)Y'_c}{I_{ox} + (V_0 + v_1)Z_g - (V_0 - v_2)Z'_c}
\end{aligned}\right\} \tag{408}$$

где S — площадь исходной грузовой ватерлинии;

x_f — абсцисса ЦТ площади исходной ватерлинии;

I_{oy} — момент инерции площади исходной ватерлинии относительно оси oy;

I_{ox} — момент инерции площади исходной ватерлинии относительно оси ox.

Формулы эти выведены в предположении малости ζ_0, ψ_0, θ_0 и прямостенности корабля, а кроме того они не учитывают влияния свободных поверхностей. Поэтому формулами (408) можно пользоваться в случае отсутствия или малости свободных поверхностей.

Если характер повреждения таков, что образуются значительные свободные поверхности, более точного результата следует ожидать от применения формул (259)—(278) § 46 и 47.

Чем точнее будет взято исходное приближение, тем меньше будет объем последующих расчетов для вычисления последовательных поправок.

По найденным значениям ζ_0, ψ_0, θ_0 наносим на чебышевский корпус исходную ватерлинию. Чебышевский корпус строится с обеими ветвями шпангоутов, причем носовые и кормовые шпангоуты удобно вычерчивать на отдельных чертежах.

Для нанесения ватерлинии акад. А. Н. Крылов рекомендует простой и наиболее точный способ, заключающийся в следующем.

Пусть $M_1K_1K_2M_2$ есть описанный около миделя прямоугольник (рис. 76) и абсцисса шпангоута № i есть x_i; полуширина корабля $KK_2 = B/2$, так что уравнение прямой K_1M_1 есть $Y = -\frac{B}{2}$, а прямой K_2M_2 есть $Y = +\frac{B}{2}$. Тогда ординаты точек P_i, N_i, Q_i будут:

$$\left.\begin{aligned} O_1P_i = Z_1 &= -\frac{1}{c_3}\left(\zeta_0 + a_3x_i - \frac{1}{2}b_3B\right) \\ ON_i = Z &= -\frac{1}{c_3}(\zeta_0 + a_3x_i) \\ O_2Q_i = Z_2 &= -\frac{1}{c_3}\left(\zeta_0 + a_3x_i + \frac{1}{2}b_3B\right) \end{aligned}\right\} \qquad (409)$$

По этим ординатам наносятся на чертеж точки P_i, N_i, Q_i. Прямая P_iQ_i будет представлять пересечение плоскости действующей ватерлинии A_1B_1 со шпангоутом № i.

Точка N_i должна лежать на прямой P_iQ_i, что служит контролем. Совершенно так же следует поступать и для всех остальных шпангоутов. Значения a_3, b_3, c_3 вычисляются по формулам (399) для данных ψ_0 и θ_0.

После выполнения указанного построения вычисляются для каждого шпангоута погрузившиеся или оголившиеся площади:

$$\omega_i = A_0B_0B_1A_1$$

и координаты центров тяжести F этих площадей:

$$y_i = GF_i; \quad z_i = F_iR.$$

Рис. 76.

Эти вычисления проще и точнее производить с помощью интегратора. При отсутствии его акад. А. Н. Крылов рекомендует для простоты заменить криволинейные обводы A_0A_1, B_1H_1 и B_0H_1 пря-

молинейными, проведенными на-глаз так, чтобы площадь сохраняла свою величину.

Тогда действительно вошедший в воду объем

$$U = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \omega\, dx. \tag{410}$$

Моменты этого объема:

$$UX_u = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} x\omega\, dx; \quad UY_u = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y\omega\, dx;$$

$$UZ_u = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} z\omega\, dx. \tag{411}$$

Здесь необходимо учесть, что при повреждениях корабля борт и палубы могут иметь пробоины, и часть объема U будет залита водой по ограничивающие ее переборки. Эта утраченная часть объема обозначается через u и моменты ее — через ux_u, uy_u, uz_u.

Величины эти должны быть вычислены, руководствуясь расположением переборок, показанных на практических чертежах. Координаты центра величины C_1, когда корабль погружен по ватерлинию A_1B_1, определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} X_c &= \frac{V_0X_{co} - v_2x_2 + UX_u - ux_u}{V_0 - v_2 + U - u} \\ Y_c &= \frac{-v_2y_2 + UY_u - uy_u}{V_0 - v_2 + U - u} \\ Z_c &= \frac{V_0Z_{co} - v_2z_2 + UZ_u - uz_u}{V_0 - v_2 + U - u} \end{aligned}\right\} \tag{412}$$

На основании формул (399) и (400) абсолютные координаты центра величины в неподвижных осях:

$$\left.\begin{aligned} \xi_c &= X_c \cos\psi + Y_c \sin\psi \sin\theta + Z_c \sin\psi \cos\theta \\ \eta_c &= Y_c \cos\theta - Z_c \sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{413}$$

Абсолютные координаты центра тяжести корабля на основании тех же формул:

$$\left.\begin{aligned} \xi_g &= X_g \cos\psi + Y_g \sin\psi \sin\theta + Z_g \sin\psi \cos\theta \\ \eta_g &= Y_g \cos\theta - Z_g \sin\theta \end{aligned}\right\} \tag{414}$$

Так как определенные по исходному приближению значения ζ_0, ψ_0 и θ_0 не являются истинными, то объем $U-u$ не будет равен объему v_1+v_2, а центр тяжести и центр величины не будут находиться на одной вертикали. Поэтому в правых частях уравнений (I), (II), (III) получатся некоторые числа, обозначенные

$$\left.\begin{aligned} U-u-(v_1+v_2)&=\delta v\\ \xi_c-\xi_g&=\delta\xi\\ \eta_c-\eta_g&=\delta\eta \end{aligned}\right\}\qquad(415)$$

Для того чтобы были соблюдены условия равновесия (I), (II) и (III), следует разыскать такие поправки $\delta\zeta$, $\delta\psi$, $\delta\theta$ к величинам ζ_0, ψ_0, θ_0, которые обратили бы в нуль правые части уравнений (415). Для определения этих поправок акад. А. Н. Крылов рекомендует разложить в ряд по степеням $\delta\zeta$, $\delta\psi$ и $\delta\theta$, входящие в уравнения (I), (II) и (III) функции от ζ, ψ, θ, ограничиваясь первыми степенями величин $\delta\zeta$, $\delta\psi$ и $\delta\theta$. Это дает уравнения:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial(U-u)}{\partial\zeta}\delta\zeta+\frac{\partial(U-u)}{\partial\psi}\delta\psi+\frac{\partial(U-u)}{\partial\theta}\delta\theta+\delta v&=0\\ \frac{\partial\xi_c}{\partial\zeta}\delta\zeta+\left(\frac{\partial\xi_c}{\partial\psi}-\frac{\partial\xi_g}{\partial\psi}\right)\delta\psi+\left(\frac{\partial\xi_c}{\partial\theta}-\frac{\partial\xi_g}{\partial\theta}\right)\delta\theta+\delta\xi&=0\\ \frac{\partial\eta_c}{\partial\zeta}\delta\zeta+\frac{\partial\eta_c}{\partial\psi}\delta\psi+\left(\frac{\partial\eta_c}{\partial\theta}-\frac{\partial\eta_g}{\partial\theta}\right)\delta\theta+\delta\eta&=0 \end{aligned}\right\}\qquad(416)$$

Частные производные

$$\frac{\partial\xi_g}{\partial\psi};\ \frac{\partial\xi_g}{\partial\theta};\ \frac{\partial\eta_g}{\partial\theta}$$

могут быть найдены путем диференцирования выражений (414):

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial\xi_g}{\partial\psi}&=-X_g\sin\psi+(Y_g\sin\theta+Z_g\cos\theta)\cos\psi\\ \frac{\partial\xi_g}{\partial\theta}&=\sin\psi\,(Y_g\cos\theta-Z_g\sin\theta)\\ \frac{\partial\eta_g}{\partial\theta}&=-(Y_g\sin\theta+Z_g\cos\theta) \end{aligned}\right\}\qquad(417)$$

Для определения численных значений частных производных от $U-u$, ξ_c, η_c акад. А. Н. Крылов предложил применить следующий метод, указанный Ньютоном.

Для вычисления производных по ζ надо, сохраняя неизменными значения ψ_0 и θ_0, провести ватерлинию при значении $\zeta_0+0{,}50$ *м* и вычислить соответствующие значения $U-u$, ξ_c и η_c.

Вычтя из этих значений вычисленные при значении $\zeta=\zeta_0$ и разделив на 0,5, получают приближенные значения частных производных:

$$\left|\frac{\partial(U-u)}{\partial\zeta}\right|,\quad\left|\frac{\partial\xi_c}{\partial\zeta}\right|,\quad\left|\frac{\partial\eta_c}{\partial\zeta}\right|.$$

Совершенно так же, взяв значения

$$\zeta = \zeta_0; \quad \psi = \psi_0 + \frac{1}{57{,}3}; \quad \theta = \theta_0,$$

вычисляют величины $U - u$, ξ_c и η_c и по вычитании из них тех же величин при $\psi = \psi_0$ и умножении на 57,3, находят частные производные

$$\left|\frac{\partial (U-u)}{\partial \psi}\right|; \quad \left|\frac{\partial \xi_c}{\partial \psi}\right|, \quad \left|\frac{\partial \eta_c}{\partial \psi}\right|.$$

Точно так же, взяв значения

$$\zeta = \zeta_0; \quad \psi = \psi_0; \quad \theta = \theta_0 + \frac{5}{57{,}3},$$

получают

$$\left|\frac{\partial (U-u)}{\partial \theta}\right|, \quad \left|\frac{\partial \xi_c}{\partial \theta}\right|, \quad \left|\frac{\partial \eta_c}{\partial \theta}\right|.$$

При вычислении частных производных по этому способу, акад. А. Н. Крылов рекомендует, после того как на чертеж нанесено измененное положение грузовой, вычислять не самые величины $U - u$, ξ_c, η_c, а их изменения, т. е. брать $\Delta\omega$ между первоначальным положением действующей ватерлинии и измененным.

Подставляя численные значения частных производных в уравнения (416) и решая их, находят искомые поправки

$$\delta\zeta, \ \delta\psi, \ \delta\theta.$$

Исправленные значения параметров будут:

$$\zeta_1 = \zeta_0 + \delta\zeta; \quad \psi_1 = \psi_0 + \delta\psi; \quad \theta_1 = \theta_0 + \delta\theta. \qquad (418)$$

Для проверки следует нанести на чертеж положение ватерлинии A_2B_2, соответствующей значениям (418), вычислить величины $U - u$, ξ_c, η_c, ξ_g, η_g и проверить, будут ли уравнения (I), (II), (III) удовлетворены.

Если полученные отступления δv_1, $\delta\xi_1$, $\delta\eta_1$ будут более допустимых, следует повторить описанный процесс для получения нового приближения.

Если обводы судна не получают резкого изменения в непосредственной близости от пересечения их с исходной ватерлинией A_1B_1 (вход палубы в воду или выход скулы), то частные производные, а следовательно, коэффициенты уравнений (416) могут быть найдены другим путем, не требующим новых графических построений.

Для этого следует на ватерлинии A_1B_1 найти след оси $\Omega\zeta$ (рис. 76) и снять входящие в воду ординаты a на ватерлинии A_1B_1 и выходящие b.

Далее следует вычислить величины:

1) площадь ватерлинии:

$$S_1 = \int_L (a + b)\, dx;$$

2) статический момент площади ватерлинии относительно оси $\Omega\xi$:

$$S_1\nu_1 = \frac{1}{2}\int\limits_L (a^2 - b^2)\,dx;$$

3) статический момент площади ватерлинии относительно оси $\Omega\eta$:

$$S_1\lambda_1 = \int\limits_L x\,(a + b)\,dx;$$

4) момент инерции площади ватерлинии относительно оси $\Omega\xi$:

$$I_\xi = \frac{1}{3}\int\limits_L (a^3 + b^3)\,dx;$$

5) момент инерции площади ватерлинии относительно оси $\Omega\eta$:

$$I_\eta = \int\limits_L x^2\,(a + b)\,dx;$$

6) центробежный момент инерции площади ватерлинии:

$$I_{\xi\eta} = \frac{1}{2}\int\limits_L x\,(a^2 - b^2)\,dx.$$

Схема вычислений указанных величин приводится ниже в численном примере.

Подобным образом или любым иным должны быть вычислены эти же элементы свободной поверхности воды в поврежденном отсеке:

1) площадь свободной поверхности s;

2) статические моменты $s\nu_s$ и $s\lambda_s$ площади s относительно осей $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$;

3) моменты инерции i_ξ и i_η площади s относительно осей $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$;

4) центробежный момент инерции $i_{\xi\eta}$ площади s относительно осей $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$.

Коэффициенты уравнений (416) при $\delta\zeta$, $\delta\psi$, $\delta\theta$:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\partial (U-u)}{\partial\zeta} &= S_1 - s\\
\frac{\partial (U-u)}{\partial\psi} &= -(S_1\lambda_1 - s\lambda_s)\\
\frac{\partial (U-u)}{\partial\theta} &= S_1\nu_1 - s\nu_s
\end{aligned}\right\} \qquad (419)$$

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial\xi_c}{\partial\zeta} = \frac{S_1\lambda_1 - s\lambda_s - (S_1 - s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u}\\
&\frac{\partial\xi_c}{\partial\psi} - \frac{\partial\xi_g}{\partial\psi} = -\left\{\frac{I_\eta - i_\eta - (S_1\lambda_1 - s\lambda_s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u} + (X_c - X_g)\sin\psi -\right.\\
&\qquad \left. - \left[(Y_c - Y_g)\sin\theta + (Z_c - Z_g)\cos\theta\right]\cos\psi\right\}\\
&\frac{\partial\xi_c}{\partial\theta} - \frac{\partial\xi_g}{\partial\theta} = \frac{I_{\xi\eta} - i_{\xi\eta} - (S_1\nu_1 - s\nu_s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u} + [(Y_c - Y_g)\cos\theta -\\
&\qquad - (Z_c - Z_g)\sin\theta]\sin\psi
\end{aligned}\right\} \qquad (420)$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\eta_c}{\partial\zeta} &= \frac{S_1\nu_1 - s\nu_s - (S_1 - s)\,\eta_c}{V_0 - v_2 + U - u}\\ \frac{\partial\eta_c}{\partial\psi} &= \frac{I_{\xi\eta} - i_{\xi\eta} - (S_1\lambda_1 - s\lambda_s)\,\eta_c}{V_0 - v_2 + U - u}\\ \frac{\partial\eta_c}{\partial\theta} - \frac{\partial\eta_g}{\partial\theta} &= \frac{I_\xi - i_\xi - (S_1\nu_1 - s\nu_s)\,\eta_c}{V_0 - v_2 + U - u} - [(Y_c - Y_g)\sin\theta +\\ &\quad + (Z_c - Z_g)\cos\theta]\cos\psi\end{aligned}\right\} \quad (421)$$

Формулы (419) — (421) получены в предположении прямостенности обводов корабля и отсека в районе пересечения их с исходной ватерлинией A_1B_1.

Дальнейший ход расчета тот же, как указано выше, а именно: составляется и решается система уравнений (416), находятся исправленные значения ζ, ψ, θ, вычисляются по теоретическому чертежу $U - u$, ξ_c, η_c и проверяются условия равновесия.

После определения положения равновесия проверяется условие устойчивости равновесия, которое требует, чтобы центр тяжести был ниже метацентра. В принятой системе координат это условие запишется так:

$$\zeta_m < \zeta_g, \quad (422)$$

но

$$\zeta_m = \zeta_c - r, \quad (423)$$

где

$$\left.\begin{aligned}\zeta_c &= \zeta_0 + a_3X_c + b_3Y_c + c_3Z_c\\ \zeta_g &= \zeta_0 + a_3X_g + b_3Y_g + c_3Z_g\\ r &= -\frac{I_{\min}}{V_0 + v_1}\end{aligned}\right\} \quad (424)$$

Здесь $I_{\min}$ — меньший из главных моментов инерции I_1 и I_2 площади ватерлинии.

Если вычисление частных производных выполнялось по формулам (419) — (421) и последние поправки $\delta\zeta$, $\delta\eta$ и $\delta\theta$ были невелики, то для вычисления момента инерции $I_{\min}$ могут быть использованы вычисленные уже элементы исходной для окончательного приближения ватерлинии. В противном случае следует снять с чертежа ординаты действующей ватерлинии и вычислить те же величины, как и для получения частных производных.

Дальнейший ход расчета таков.

Координаты центра тяжести площади ватерлинии:

$$\left.\begin{aligned}\lambda_0 &= \frac{S\lambda - s\lambda_s}{S - s}\\ \nu_0 &= \frac{S\nu - s\nu_s}{S - s}\end{aligned}\right\} \quad (425)$$

Центральные моменты инерции площади ватерлинии относительно осей, параллельных осям $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$:

$$\left.\begin{aligned} I_{\xi_0} &= I_\xi - i_\xi - (S - s)\,\nu_0^2 \\ I_{\eta_0} &= I_\eta - i_\eta - (S - s)\,\lambda_0^2 \\ I_{\xi\eta_0} &= I_{\xi\eta} - i_{\xi\eta} - (S - s)\,\lambda_0 \nu_0 \end{aligned}\right\} \qquad (426)$$

Вычисляется угол α по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2I_{\xi\eta_0}}{I_{\eta_0} - I_{\xi_0}}. \qquad (427)$$

Главные моменты инерции находятся по формулам:

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{2}(I_{\xi_0} + I_{\eta_0}) + \frac{1}{2}\,\frac{I_{\eta_0} - I_{\xi_0}}{\cos 2\alpha} \\ I_2 &= \frac{1}{2}(I_{\xi_0} + I_{\eta_0}) - \frac{1}{2}\,\frac{I_{\eta_0} - I_{\xi_0}}{\cos 2\alpha} \end{aligned}\right\} \qquad (428)$$

Меньший из этих двух моментов и будет искомый. Далее вычисляется метацентрическая высота h по формулам (422) — (424).

$$h = -(\zeta_c - \rho - \zeta_g). \qquad (429)$$

Численный пример расчета непотопляемости по способу акад. А. Н. Крылова

Элементы неповрежденного корабля

Длина по грузовой	$L = 110{,}0$ *м*
Ширина наибольшая	$B = 15{,}5$ „
Высота борта у мидель-шпангоута	$H = 8{,}41$ „
Осадка по исходную ватерлинию	$T = 4{,}84$ „
Водоизмещение объемное по исходную ватерлинию	$V = 4110$ *м*³
Водоизмещение весовое	$D = 4210$ *т*
Погружение ЦВ под грузовой	$Z_{c_0} = +1{,}94$ *м*
Абсцисса ЦВ от ⊗	$X_{c_0} = -1{,}43$ „
Возвышение ЦТ над грузовой	$Z_{g_0} = -1{,}20$ „
Абсцисса ЦТ от ⊗	$X_{g_0} = -1{,}43$ „
Метацентрический радиус поперечный	$r = 4{,}14$ „
„ „ продольный	$R = 183$ „
Метацентрическая высота поперечная	$h = 1{,}00$ „
„ „ продольная	$H = 177{,}0$ „
Площадь исходной ватерлинии	$S = 1190$ *м*²
Абсцисса ЦТ площади ватерлинии	$x_f = -3{,}18$ *м*
Момент инерции площади ватерлинии относительно оси ox	$I_x = 17\,000$ *м*⁴
Момент инерции относительно оси fy	$I_{yf} = 754\,000$ „
Момент инерции относительно оси oy	$I_{yo} = 766\,000$ „

Элементы поврежденных отсеков

1. Отсеки, закрытые сверху, количество воды в которых не зависит от положения корабля:

Количество влившейся воды . . . . $v_1 = 180$ м³

Координаты ЦТ влившейся воды . . . . $x_1 = 45$ м, $y_1 = 2,3$ ", $z_1 = 2,54$ "

2. Отсеки, открытые сверху и имеющие свободную поверхность:

Количество влившейся воды по исходную ватерлинию . . . . $v_2 = 280$ м³

Координаты ЦТ объема v_2 . . . . $x_2 = 29,4$ м, $y_2 = 2,10$ ", $z_2 = 1,91$ "

Площадь свободной поверхности . . . . $s = 81$ м²

Координата ее ЦТ относительно миделя . . . . $a = 29,6$ м

Координата относительно диаметрали . . . . . $b = 2,56$ "

Собственные моменты инерции площади s

относительно оси, параллельной ox . . . . . $i = 890$ м⁴

относительно оси, параллельной oy . . . . . $j = 2180$ "

Предполагается, что затоплен всего лишь один открытый сверху отсек, ограниченный наружной обшивкой, продольной переборкой в диаметральной плоскости и поперечными переборками, отстоящими на $0,2L$ и $0,3L$ в нос от мидель-шпангоута. Поперечные сечения по отсеку через $0,05L$ показаны на рис. 77, чебышевские сечения корабля изображены на рис. 78.

Координаты ЦТ поврежденного корабля определяются по формулам (404):

$$X_g = \frac{V_0 X_{g_0} + v_1 x_1}{V_0 + v_1} = \frac{-4110 \cdot 1,43 + 180 \cdot 45}{4110 + 180} = 0,52 \text{ м},$$

$$Y_g = \frac{v_1 y_1}{V_0 + v_1} = \frac{180 \cdot 2,3}{4290} \cong 0,10 \text{ м},$$

$$Z_g = \frac{V_0 Z_{g_0} + v_1 z_1}{V_0 + v_1} = \frac{-4110 \cdot 1,20 + 180 \cdot 2,54}{4290} = -1,04 \text{ м}.$$

Определяем положение корабля по исходную ватерлинию первого приближения по формулам акад. А. Н. Крылова для прямостенного судна [формулы (408)].

Угол диферента равен:

$$\psi_0 = \frac{V_0 X_{c_0} - v_2 x_2 - (V_0 + v_1) X_g + (v_1 + v_2) x_f}{I_{y_0} - S x_f^2 - V_0 Z_{c_0} + v_2 z_2 + (V_0 + v_1) Z_g} =$$

$$= \frac{-4110 \cdot 1,43 - 280 \cdot 29,4 - 4290 \cdot 0,52 - (180 + 280) \cdot 3,18}{766\,000 - 1190 \cdot 3,18^2 - 4110 \cdot 1,94 + 280 \cdot 1,91 - 4290 \cdot 1,04} = -0,024.$$

Погружение равно:

$$\zeta_0 = \frac{v_1 + v_2}{S} + x_f\psi = \frac{180 + 280}{1190} + 3{,}18 \cdot 0{,}024 = 0{,}47 \text{ м}.$$

Угол крена равен:

$$\theta = \frac{(V_0 + v_1)\,Y_g + v_2 y_2}{I_x + (V_0 + v_1)\,Z_g - V_0 Z_{c_0} + v_2 z_2} =$$

$$= \frac{4290 \cdot 0{,}097 + 280 \cdot 2{,}10}{17\,000 - 4290 \cdot 1{,}04 - 4110 \cdot 1{,}94 + 280 \cdot 1{,}91} = 0{,}197.$$

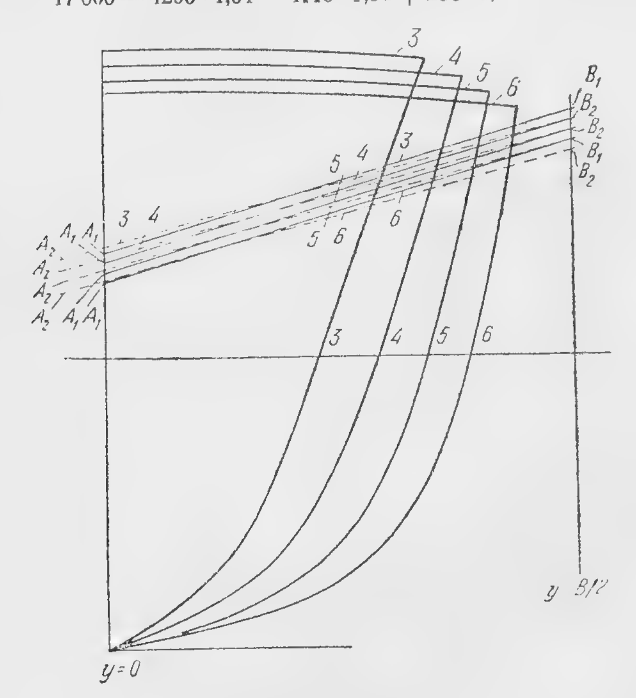


Рис. 77.

Рассчитаем положение корабля по исходную ватерлинию первого приближения по метацентрическим формулам § 46 и 47.

$$\varepsilon = \frac{v_1 + v_2}{S_0 - s} = \frac{180 + 280}{1190 - 81} = 0{,}41 \text{ м}.$$

Абсцисса ЦТ поврежденной ватерлинии (270):

$$\alpha = x_f - (a - x_f)\frac{s}{S_0 - s} = -3{,}18 - (29{,}6 + 3{,}2)\frac{81}{1190 - 81} = -5{,}11 \text{ м}.$$

Ордината ЦТ поврежденной ватерлинии (271):

$$\beta = -\frac{sb}{S_0 - s} = -0{,}19 \text{ м}.$$

Изменение поперечной метацентрической высоты (272):

$$\Delta h = \frac{1}{V}\left[\left(T + \frac{\varepsilon}{2}\right)\sum v_i + \sum v_i (T - z_i) - \sum i_i - \sum s_i b_i^2 - \right.$$

$$\left. - \left(S_0 - \sum s_i\right)\beta^2\right] = \frac{1}{4110}\left[\left(4,84 + \frac{0,41}{2}\right)(180 + 280) + (180 \cdot 2,30 + \right.$$

$$\left. + 280 \cdot 2,93) - 890 - 81 \cdot 2,56^2 - (1190 - 81)\, 0,19^2\right] = -0,09 \text{ м.}$$

Исправленная поперечная метацентрическая высота

$$h_1 = h + \Delta h = 1,00 - 0,09 = 0,91 \text{ м.}$$

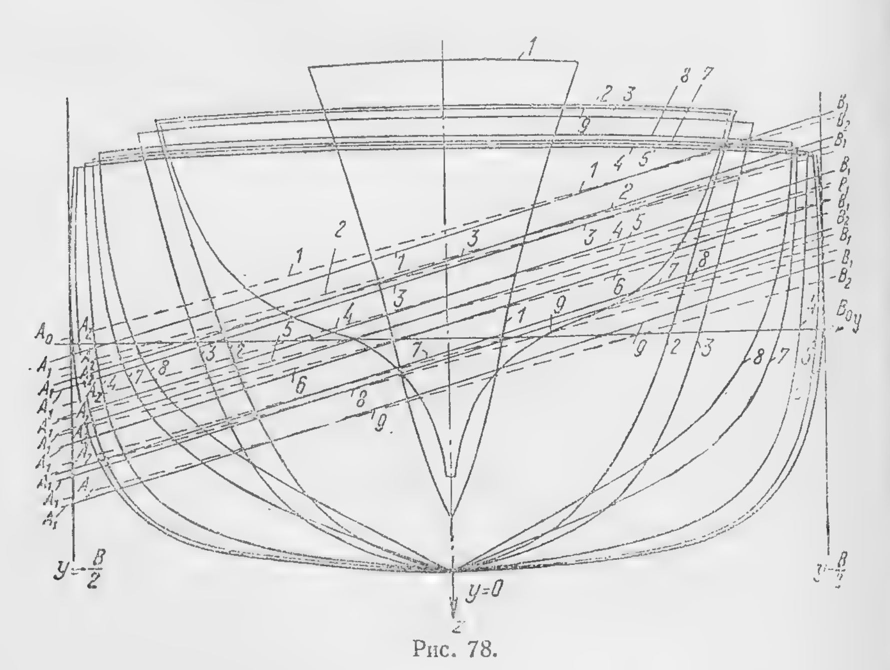


Рис. 78.

Изменение продольной метацентрической высоты (274):

$$\Delta H = -\frac{1}{V}\left[\sum j_i + \sum s_i (a_i - x_f)^2 + \left(S_0 - \sum s_i\right)(a - x_f)^2\right] =$$

$$= -\frac{1}{4110}\left[2180 + 81\,(29,6 + 3,2)^2 + (1190 - 81)\,(-5,11 + 3,18)^2\right] =$$

$$= -22,8 \text{ м.}$$

Исправленная продольная метацентрическая высота:

$$H_1 = H + \Delta H = 180 - 23 = 157 \text{ м.}$$

Угол крена (273):

$$\theta_0 = \frac{\sum v_i y_i - \beta \sum v_i}{4V\, 9_1\,(h + \Delta h)} = \frac{180 \cdot 2,3 + 280 \cdot 2,1 + 0,19 \cdot 460}{4290 \cdot 0,91} = 0,291.$$

Угол диферента (275):

$$\psi_0 = -\frac{\sum v_i x_i - a\sum v_i}{V(H+\Delta H)} = -\frac{180\cdot 45 + 280\cdot 29{,}4 + 5{,}11\cdot 460}{4110\cdot 157} = -0{,}029.$$

Значение погружения

$$\zeta_0 = \varepsilon + \alpha\psi_0 = 0{,}41 + 5{,}11\cdot 0{,}029 = 0{,}56.$$

Ввиду того, что в данном случае имеется значительная свободная поверхность, дальнейший расчет ведем, приняв за исходную ватерлинию, определенную по метацентрическим формулам.

Для нанесения ординат ватерлинии на шпангоуты пользуемся формулой (409), с учетом формулы (399).

$$Z = X\frac{\operatorname{tg}\psi}{\cos\theta} - \frac{\zeta_0}{\cos\psi\cos\theta} \mp \frac{B}{2}\operatorname{tg}\theta.$$

Но

$$\psi \cong \operatorname{tg}\psi = -0{,}029;\quad \cos\psi = 1{,}00,$$

$$\theta^\circ = 57{,}3\cdot 0{,}291 = 16{,}7^\circ;\ \sin\theta = 0{,}286;\ \cos\theta = 0{,}958,\ \operatorname{tg}\theta = 0{,}300.$$

Абсцисса $X = x\frac{L}{2}$, где x — чебышевский коэффициент. Подставляя численные значения в формулу, получим:

$$z = -x\cdot 55\cdot\frac{0{,}029}{0{,}958} \mp 7{,}75\cdot 0{,}300 - \frac{0{,}56}{0{,}958} = -0{,}58 - 1{,}66\,x \mp 2{,}32.$$

Вычисления производим в табл. 58.

Таблица 58

Вычисление положения ватерлинии

I	II	III	IV	V	VI
№ шпангоутов	Чебышевские коэффициенты x	$1{,}66\,x$	$V + 2{,}32$ z_1	$-0{,}58 + III$ z_0	$V - 2{,}32$ z_2
1	0,912	—1,52	0,22	—2,10	—4,42
2	0,601	—1,00	0,74	—1,58	—3,90
3	0,529	—0,85	0,89	—1,43	—3,75
4	0,168	—0,28	1,46	—0,86	—3,18
5	0	0	1,74	—0,58	—2,90
6	—0,168	0,28	2,02	—0,30	—2,62
7	—0,529	0,85	2,59	+0,27	—2,05
8	—0,601	1,00	2,74	0,42	—1,90
9	—0,912	1,52	3,26	0,94	—1,36

Проводим на чертеже корпуса прямые, параллельные оси oz, на расстоянии $\frac{B}{2}$ от диаметрали и откладываем от начальной ватерли-

нии на прямой $Y = -\frac{B}{2}$ отрезки z_1, на прямой $Y = 0$ отрезки z_0 и на прямой $Y = \frac{B}{2}$ отрезки z_2.

Соединяя концы отрезков прямыми, получаем линии пересечения искомой ватерлинии с плоскостями чебышевских шпангоутов.

Аналогичным образом наносится ватерлиния на чертеже шпангоутов отсека, причем здесь достаточно ограничиться вычислением двух ординат у борта и диаметрали, так как затопленный отсек имеет продольную водонепроницаемую переборку в диаметральной плоскости. Относящиеся сюда расчеты приводятся в табл. 59.

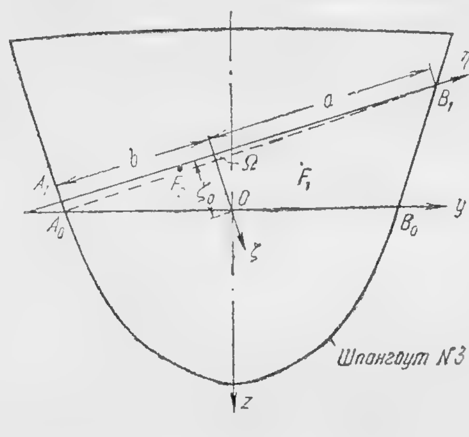


Рис. 79.

После нанесения ватерлинии на чертеже корпуса и чертеже сечений по отсеку следует приступить к вычислению объема $U - u$ и его моментов. Проще всего это было бы выполнить с помощью интегратора, последовательно совместив его ось с начальной ватерлинией и с диаметралью. В настоящем расчете был применен другой прием, показанный подробно на примере расчета для шпангоута № 3 (рис. 79). Вошедшая дополнительно в воду площадь $A_0B_0B_1A_1$ этого шпангоута принимается за четырехугольник, разделенный диагональю A_0B_1 на два треугольника — $A_0B_0B_1$ и $A_0A_1B_1$. Центры тяжести F каждого треугольника находятся на пересечении медиан.

Основание A_0B_0 треугольника $A_0B_0B_1$ равно 9,05 *м*, высота 3,25 *м*, так что площадь его равна $\omega_3' = \frac{1}{2} 9{,}05 \cdot 3{,}25 = 14{,}7$ *м*². Координаты ЦТ F_1 площади ω_3' равны $y_3' = 2{,}15$ *м*, $z_3' = -1{,}08$ *м*, моменты площади $\bar{\omega}_3'$ равны $\omega_3' y_3' = 14{,}7 \cdot 2{,}15 = 31{,}6$ *м*³.

$$\omega_3' z_3' = -14{,}7 \cdot 1{,}08 = -15{,}9 \text{ м}^3.$$

Основание A_0B_1 треугольника $A_0A_1B_1$ равно 10,6 *м*, высота 0,37 *м*, площадь $\omega_3'' = \frac{1}{2} 10{,}6 \cdot 0{,}37 = 2{,}0$ *м*².

Координаты точки F_2 $y_3'' = -1{,}45$; $z_3'' = -1{,}05$ *м*.

Момент площади ω_3'' относительно диаметральной плоскости XOZ равен $\omega_3'' y_3'' = -2{,}0 \cdot 1{,}45 = -2{,}9$; относительно плоскости XOY:

$$\omega_3'' z_3'' = -2{,}0 \cdot 1{,}05 = -2{,}1 \text{ м}^3.$$

Таблица 59

Вычисление положения ватерлинии по отсеку

I	II	III	IV	V
№ шпангоута	x	$-1{,}66\ x$	$-0{,}58+\text{III}$ z_0	IV—2,32 z_2
3	0,7	—1,16	—1,75	—4,07
4	0,6	—1,00	—1,58	—3,90
5	0,5	—0,83	—1,41	—3,73
6	0,4	—0,66	—1,24	—3,56

Полная площадь $A_0B_0B_1A_1=\omega_3$ и ее моменты:

$$\omega_3=\omega_3'+\omega_3''=14{,}7+2{,}0=16{,}7\ м^2;$$

$$\omega_3 y_3=\omega_3' y_3'+\omega_3'' y_3''=+31{,}6-2{,}9=28{,}7\ м^3,$$

$$\omega_3 z_3=\omega_3' z_3'+\omega_3'' z_3''=-15{,}9-2{,}1=-18{,}0\ м^3.$$

Выполнив аналогичные расчеты для каждого чебышевского шпангоута и для каждого сечения по отсеку, вычисляем объемы и их моменты. Вычисление объема U корабля и моментов его произведено в табл. 60. Объем u отсека и его моменты вычислены в табл. 61.

Таблица 60

Вычисление объема U и его моментов

$\Delta L=12{,}22$

I	II	III	IV	V	VI
№ шпангоутов	Чебышевские абсциссы x_i	Площади ω_i	II · III	$\omega_i y_i$	$\omega_i z_i$
4	50,2	6,0	301	1,1	— 6,6
3	33,1	16,7	552	28,7	—18,0
2	28,3	15,9	450	35,2	—17,3
1	9,24	12,7	117	75,5	—16,8
0	0	8,9	0	86,2	—15,3
1	—9,24	4,7	—43	88,9	—13,9
2	—28,3	—2,5	+71	57,8	— 8,6
3	—33,1	—3,7	123	45,6	— 7,0
4	—50,2	—2,5	125	0,3	— 1,0
		56,2	1696	419,3	—104,5

Объем $U=\Delta L\sum\omega_i\ =12{,}22\cdot 56{,}2\ =686\ м^3,$

Моменты $UX_u=\Delta L\sum\omega_i X_i=12{,}22\cdot 1696\ =20700\ м^4,$

$UY_u=\Delta L\sum\omega_i Y_i=12{,}22\cdot 419{,}3\ =5110\ м^4,$

$UZ_u=\Delta L\sum\omega_i Z_i=-12{,}22\cdot 104{,}5=-1280\ м^4.$

Таблица 61

Вычисление объема по отсеку и его моментов

$\Delta L = 5{,}50$

I	II	III	IV	V	VI
№ сечений	Абсциссы сечений X	площади ω_i	II · III $\omega_i x_i$	Моменты $\omega_i y_i$	Моменты $\omega_i z_i$
7	38,5	9,8	376	51,5	—17,0
6	33,0	12,5	413	43,3	—16,5
5	27,5	13,2	364	33,9	—15,3
4	22,0	14,1	310	22,2	—12,4
$\sum'$		49,6	1463	150,9	—61,2
Поправки		11,9	343	36,9	—14,7
Исправл. $\sum$		37,7	1120	114,0	—46,5

$$\text{Объем } u = \Delta L \sum \omega_i = 5{,}5 \cdot 37{,}7 = 208 \text{ м}^3.$$

$$\text{Моменты: } ux_u = \Delta L \sum \omega_i x_i = 5{,}5 \cdot 1120 = 6150 \text{ м}^4,$$

$$uy_u = \Delta L \sum \omega_i y_i = 5{,}5 \cdot 114 = 628 \text{ м}^4,$$

$$uz_u = \Delta L \sum \omega_i z_i = -5{,}5 \cdot 46{,}5 = -256 \text{ м}^4.$$

Вычисляем координаты центра величины объема по исходную ватерлинию первого приближения:

$$X_c = \frac{V_0 X_0 - v_2 x_2 + UX_u - ux_u}{V_0 - v_2 + U - u} = \frac{-5880 - 8240 + 20\,700 - 6150}{4110 - 280 + 686 - 208} = 0{,}10 \text{ м},$$

$$Y_c = \frac{-v_2 y_2 + UY_u - uy_u}{V_0 - v_2 + U - u} = \frac{-587 + 5110 - 628}{4110 - 280 + 686 - 208} = 0{,}90 \text{ м}.$$

$$Z_c = \frac{V_0 Z_0 - v_2 z_2 + UZ_u - uz_u}{V_0 - v_2 + U - u} = \frac{7960 - 530 - 1280 - 256}{4308} = 1{,}49 \text{ м}.$$

Абсолютные координаты центра величины (413):

$$\xi_c = X_c \cos\psi + Y_c \sin\psi \sin\theta + Z_c \sin\psi \cos\theta =$$

$$= 0{,}10 - 0{,}90 \cdot 0{,}029 \cdot 0{,}281 - 1{,}49 \cdot 0{,}029 \cdot 0{,}958 = 0{,}05 \text{ м}.$$

$$\eta_c = Y_c \cos\theta - Z_c \sin\theta = 0{,}90 \cdot 0{,}958 - 1{,}49 \cdot 0{,}281 = 0{,}44 \text{ м}.$$

Абсолютные координаты центра тяжести (414):

$$\xi_g = X_g \cos\psi + Y_g \sin\psi \sin\theta + Z_g \sin\psi \cos\theta =$$

$$= 0{,}52 - 0 + 1{,}04 \cdot 0{,}029 \cdot 0{,}958 = 0{,}55 \text{ м};$$

$$\eta_g = Y_g \cos\theta - Z_g \sin\theta = 0{,}10 \cdot 0{,}958 + 1{,}04 \cdot 0{,}281 = 0{,}34 \text{ м}.$$

Определяем поправку на неточность исходной ватерлинии первого приближения (I), (II), (III):

$$\delta v = U - u - (v_1 + v_2) = 686 - 208 - 460 = 18 \text{ м}^3;$$

$$\delta\xi = \xi_c - \xi_g = 0,05 - 0,55 = -0,50 \text{ м};$$

$$\delta\eta = \eta_c - \eta_g = 0,44 - 0,39 = 0,05 \text{ м}.$$

Так как обводы корабля в области пересечения их с исходной ватерлинией первого приближения не изменяют своего характера и так как поправки δv, $\delta\xi$, $\delta\eta$ невелики, дальнейшие расчеты выполняем в предположении прямостенности обводов корабля между исходной и истинной ватерлинией.

Необходимые для расчета элементы исходной ватерлинии вычисляем в табл. 62. Входящие и выходящие ординаты a и b ватерлинии измеряются от оснований перпендикуляров, опущенных из точек Ω на направления ватерлинии A_1B_1.

Элементы потерянной площади ватерлинии в пределах отсека рассчитываются в табл. 63.

Вычисляем коэффициенты уравнений для определения поправок второго приближения:

$$\frac{\partial (U-u)}{\partial \zeta} = S_1 - s = 1210 - 101 = 1109 \text{ м}^2;$$

$$\frac{\partial (U-u)}{\partial \psi} = -(S_1\lambda_1 - s\lambda_s) = 510 + 3000 = 3510 \text{ м}^3;$$

$$\frac{\partial (U-u)}{\partial \theta} = (S_1\nu_1 - s\nu_s) = 654 - 710 = -56 \text{ м}^3;$$

$$\frac{\partial \xi_c}{\partial \zeta} = \frac{S_1\lambda_1 - s\lambda_s - (S_1 - s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u} = \frac{-3510 - 1109 \cdot 0,05}{4110 - 280 + 686 - 208} = -0,83.$$

$$\frac{\partial \xi_c}{\partial \psi} - \frac{\partial \xi_g}{\partial \psi} = -\left\{\frac{I_\eta - i_\eta - (S_1\lambda_1 - s\lambda_s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u} + (X_c - X_g)\sin\psi - \right.$$

$$\left. - [(Y_c - Y_g)\sin\theta + (Z_c - Z_g)\cos\theta]\cos\psi\right\} =$$

$$= -\left\{\frac{745\,000 - 92\,000 + 0,05 \cdot 3510}{4308} - \right.$$

$$-(0,10 - 0,52)\,0,029 - [(0,90 - 0,10)\,0,281 +$$

$$\left. + (1,49 + 1,04)\,0,958]\right\} = -148,8 \text{ м}.$$

$$\frac{\partial \xi_c}{\partial \theta} - \frac{\partial \xi_g}{\partial \theta} = \frac{I_{\xi\eta} - i_{\xi\eta} - (S_1\nu_1 - s\nu_s)\,\xi_c}{V_0 - v_2 + U - u} + [(Y_c - Y_g)\cos\theta -$$

$$-(Z_c - Z_g)\sin\theta]\sin\psi = \frac{1520 - 20\,800 + 0,05 \cdot 56}{4308} -$$

$$-[(0,90 - 0,10)\,0,958 - (1,49 + 1,04) \times$$

$$\times 0,281]\,0,029 = -4,46 \text{ м}.$$

Таблица 62

Вычисление элементов наклонной ватерлинии

№ ординат	x	a	b	$a+b$	II · V	II · VI	a^2	b^2	a^2-b^2	II · X	a^3	b^3
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
1	0,912	2,45	1,00	3,45	3,15	2,87	6,00	1,00	5,00	4,56	15	1
2	0,601	6,25	4,36	10,61	5,78	3,48	39,06	19,01	20,05	12,00	244	83
3	0,529	6,70	5,36	12,06	6,37	3,37	44,89	28,73	16,16	8,54	301	154
4	0,168	7,95	7,15	15,10	2,53	0,42	63,20	51,12	12,08	2,03	502	365
5	0	8,10	7,53	15,63	0	0	65,61	56,70	8,91	0	531	427
6	—0,168	8,13	7,70	15,83	—2,66	0,45	66,10	59,29	6,81	— 1,14	537	456
7	—0,529	7,35	6,05	13,40	—7,08	3,75	54,02	36,60	17,42	— 9,21	397	221
8	—0,601	7,00	5,30	12,30	—7,39	4,44	49,00	28,09	20,91	—12,56	343	149
9	—0,912	0,70	0,90	1,60	—1,46	1,33	0,41	0,81	—0,32	0,29	0	1
		54,63	45,35	98,98 $\sum_1$	—0,76 $\sum_2$	20,11 $\sum_3$	388,37	281,35	107,02 $\sum_4$	4,51 $\sum_5$	4727 $\sum_6$	

I $S_1 = \Delta L \sum_1 = 12{,}22 \cdot 98{,}98 = 1210$ м²;

II $S_1\lambda_1 = \Delta L \frac{L}{2} \sum_2 = -12{,}22 \cdot 55 \cdot 0{,}76 = -510$ м³;

III $S_1\nu_1 = \frac{\Delta L}{2} \sum_4 = 6{,}11 \cdot 107 = 654$ м³,

IV $I_\xi = \frac{1}{3} \Delta L \sum_6 = \frac{1}{3} \cdot 12{,}22 \cdot 4727 = 19\,300$ м⁴;

V $I_\eta = \Delta L \left(\frac{L}{2}\right)^2 \sum_3 = 12{,}22 \cdot 55^2 \cdot 20{,}11 = 745\,000$ м⁴;

VI $I_{\xi\eta} = \frac{1}{2} \Delta L \frac{L}{2} \sum_5 = 6{,}11 \cdot 55 \cdot 4{,}51 = 1520$ м⁴.

Таблица 63

Вычисление элементов потерянной площади ватерлинии

№	i	a	b	$a+b$	II · V	II · VI	a^2	b^2	a^2-b^2	II · X	a^3	b^3
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
4	4	7,45	—0,36	7,09	28,4	113	55,5	0,1	55,4	222	413	0
5	5	6,95	—0,40	6,55	32,8	164	48,3	0,2	48,1	240	336	0
6	6	6,25	—0,45	5,80	34,8	209	39,1	0,2	38,9	234	244	0
7	7	5,42	—0,46	4,96	34,7	243	29,4	0,2	29,2	204	159	0
Суммы				24,40	130,7	729	—	—	171,6	900	1152	
Поправки				6,02	31,6	178	—	—	42,3	213	286	
Исправл. суммы				18,38	99,1	551	—	—	129,3	687	866	
				$\sum_1$	$\sum_2$	$\sum_3$			$\sum_4$	$\sum_5$	$\sum_6$	

I $s = \Delta l \sum_1 = 5,5 \cdot 18,38 = 101$ $м^2$,

II $s\lambda_s = \Delta l^2 \sum_2 = 5,5^2 \cdot 99,1 = 3000$ $м^3$,

III $s\nu_s = \Delta l \sum_4 = 5,5 \cdot 129,3 = 710,0$ $м^3$,

IV $i_\xi = \frac{1}{3} \Delta l \sum_6 = \frac{1}{3} \cdot 5,5 \cdot 866 = 1590$ $м^3$,

V $i_\eta = \Delta l^3 \sum_3 = 5,5^3 \cdot 551 = 92\,000$ $м^4$,

VI $i_{\xi\eta} = \Delta l^2 \sum_5 = 5,5^2 \cdot 687 = 20\,800$ $м^4$.

$$\frac{\partial\eta_c}{\partial\zeta}=\frac{S_1\nu_1-s\nu_s-(S_1-s)\,\eta_c}{V_0-v_2+U-u}=\frac{-56-1109\cdot 0{,}44}{4308}=-0{,}126.$$

$$\frac{\partial\eta_c}{\partial\psi}=-\frac{I_{\xi\eta}-i_{\xi\eta}-(S_1\lambda_1-s\lambda_s)\,\eta_c}{V_0-v_2+U-u}=-\frac{1520-20\,800+0{,}44\cdot 3510}{4308}=3{,}88\ \text{м}.$$

$$\frac{\partial\eta_c}{\partial\theta}-\frac{\partial\eta_g}{\partial\theta}=\frac{I_\xi-i_\xi-(S_1\nu_1-s\nu_s)\,\eta_c}{V_0-v_2+U-u}-[(Y_c-Y_g)\sin\theta+$$

$$+(Z_c-Z_g)\cos\theta]\cos\psi=$$

$$=\frac{19\,300-1590+0{,}44\cdot 56}{4308}-[(0{,}90-0{,}10)\,0{,}281+$$

$$+(1{,}49+1{,}04)\cdot 0{,}958]=1{,}47\ \text{м}.$$

Составляем систему уравнений (416):

$$1109\,\delta\zeta+3510\,\delta\psi-56\cdot\delta\theta=-18,$$

$$-0{,}83\,\delta\zeta-148{,}8\,\delta\psi-4{,}46\,\delta\theta=0{,}50,$$

$$-0{,}126\,\delta\zeta+3{,}88\,\delta\psi+1{,}47\,\delta\theta=-0{,}05.$$

Решая систему уравнений, находим:

$$\delta\zeta=-0{,}0098\ \text{м};\quad \delta\psi=-0{,}0024;\quad \delta\theta=-0{,}0296,$$

откуда на основании (418) получаем:

$$\zeta_1=\zeta_0+\delta\zeta=0{,}56-0{,}01=0{,}55\ \text{м},$$

$$\psi_1=\psi_0+\delta\psi=-0{,}029-0{,}0024=-0{,}0314,$$

$$\theta_1=\theta_0+\delta\theta=0{,}291-0{,}030=0{,}261=14{,}05^\circ.$$

Вычисляем опять ординаты пересечений ватерлинии, определяемой новыми значениями ζ, ψ, θ с прямыми $Y=\pm\frac{B}{2}$ и полагаем:

$$\sin\psi=-0{,}0314;\quad \cos\psi=1{,}00,$$

$$\sin\theta=0{,}259;\quad \cos\theta=0{,}966;\quad \operatorname{tg}\theta=0{,}268,$$

$$Z=X\frac{\operatorname{tg}\psi}{\cos\theta}\mp\frac{B}{2}\operatorname{tg}\theta-\frac{\zeta}{\cos\psi\cdot\cos\theta}=-0{,}57-0{,}0325\,x\mp 2{,}08\ \text{м}.$$

Определяя, как прежде, величины вошедших в воду и вышедших из нее площадей шпангоутов и координаты центров их тяжести, вычисляем объемы $U-u$ и их моменты. Вычисления производим в табл. 64 и 65.

Таблица 64

Вычисление положения аварийной ватерлинии

I	II	III	IV	V	VI
№ шпангоутов	Абсциссы шпангоутов	$-0{,}0325X$	z_1 V + 2,08	z_0 —0,57 + III	z_2 V—2,08
		Для корабля			
1	50,2	—1,63	—0,12	—2,20	—4,28
2	33,1	—1,08	—0,43	—1,65	—3,73
3	28,3	—0,92	0,57	—1,49	—3.57
4	9,2	—0,30	1,21	—0,87	—2,95
5	0	0	1,51	—0,57	—2,65
6	— 9,2	0,30	1,81	—0,27	—2,35
7	—28,3	0,92	2,43	0,35	—1,73
8	—33,1	1,08	2,59	0,51	—1,57
9	—50,2	1,63	3,14	1,06	—1,02
		Для отсека			
7	38,5	—1,25	—	—1,82	3,90
6	33,0	—1,07	—	—1,64	3,72
5	27,5	—0,89	—	—1,46	3,54
4	22,0	—0,71	—	—1,28	3,36

Таблица 65

Вычисление объема U и его моментов

I	II	III	IV	V	VI
№ шпангоутов	Абсциссы X_i	Площади ω_i	II · III	$\omega_i Y_i$	$\omega_i Z_i$
1	50,2	6,1	306	0,9	— 7,1
2	33,1	16,2	536	23,6	—17,3
3	28,1	16,6	485	31,4	—17,4
4	9,2	12,7	117	66,2	—21,0
5	0	8,7	0	75,7	—12,5
6	— 9,2	4,4	—40	80,6	—11,1
7	—28,1	— 3,7	108	52,0	— 7,3
8	—33,1	— 5,0	166	40,3	— 4,5
9	—50,2	— 2,6	130	0,1	— 1,2
		53,4	1808	370,8	—99,4

$$U_1 = 12{,}22 \cdot 53{,}4 = 653 \ м^3,$$

$$U_1 X_{u1} = 12{,}22 \cdot 1808 = 22\,100 \ м^4,$$

$$U_1 Y_{u1} = 12{,}22 \cdot 370{,}8 = 4530 \ м^4,$$

$$U_1 Z_{u1} = -12{,}22 \cdot 99{,}4 = -1210 \ м^4.$$

Таблица 66

Вычисление объема отсека и его моментов

I	II	III	IV	V	VI
№ шпангоутов	Множители абсцисс i	Площади ω_i	II · III	$\omega_i Y_i$	$\omega_i Z_i$
7	7	9,2	64,4	24,7	—12,0
6	6	11,6	69,6	32,2	—14,6
5	5	12,9	64,5	41,6	—16,0
4	4	13,7	54,8	53,0	—15,9
Суммы		47,4	253,3	151,5	—58,5
Поправки		11,5	59,6	38,8	—14,0
Исправленн. суммы		35,9	193,7	112,7	—44,5

$$U_1 = 5{,}5 \cdot 35{,}9 = 197 \ м^3,$$

$$U_1 X_{u_1} = 5{,}5^2 \cdot 194 = 5860 \ м^4,$$

$$U_1 Y_{u_1} = 5{,}5 \cdot 1127 = 620 \ м^4,$$

$$U_1 Z_{u_1} = -5{,}5 \cdot 44{,}5 = -245 \ м^4.$$

Координаты ЦВ:

$$X_c = \frac{V_0 X_0 - v_2 x_2 + U_1 X_{u_1} - u_1 x_{u_1}}{V_0 - v_2 + U_1 - u_1} =$$

$$= \frac{-5880 - 8240 + 22\,100 - 5860}{4110 - 280 + 653 - 197} = 0{,}50 \ м,$$

$$Y_c = \frac{-v_2 y_2 + U_1 Y_{u_1} - u y_{u_1}}{V_0 - v_2 + U_1 - u_1} = \frac{-587 + 4530 - 620}{4286} = 0{,}78 \ м,$$

$$Z_c = \frac{V_0 Z_0 - v_2 z_2 + U_1 Z_{u_1} - u_1 z_{u_1}}{V_0 - v_2 + U_1 - u_1} = \frac{7960 - 530 - 1210 + 245}{4286} = 1{,}50 \ м.$$

Вычисляем абсолютные координаты центра величины и центра тяжести:

$$\xi_c = X_c \cos\psi + Y_c \sin\psi \sin\theta + Z_c \sin\psi \cos\theta =$$

$$= 0{,}50 - 0{,}78 \cdot 0{,}0314 \cdot 0{,}259 - 1{,}50 \cdot 0{,}0314 \cdot 0{,}966 = 0{,}46 \ м;$$

$$\eta_c = Y_c \cos\theta - Z_c \sin\theta = 0{,}78 \cdot 0{,}966 - 1{,}50 \cdot 0{,}259 = 0{,}36 \ м;$$

$$\xi_g = X_g \cos\psi + Y_g \sin\psi \sin\theta + Z_g \sin\psi \cos\theta =$$

$$= 0{,}52 - 0 + 1{,}04 \cdot 0{,}0314 \cdot 0{,}966 = 0{,}55 \ м;$$

$$\eta_g = Y_g \cos\theta - Z_g \sin\theta = 0{,}10 \cdot 0{,}961 + 1{,}04 \cdot 0{,}259 = 0{,}37 \ м.$$

Поправки на отклонения от условий равновесия:

$$\delta v = U_1 - u_1 - (v_1 + v_2) = 653 - 197 - 460 = -4{,}0 \ м^3,$$

$$\delta\xi = \xi_c - \xi_g = 0{,}46 - 0{,}55 = -0{,}09 \ м,$$

$$\delta\eta = \eta_c - \eta_g = 0{,}36 - 0{,}37 = -0{,}01 \ м.$$

Полученные расхождения с условиями равновесия пренебрежимо малы, и поэтому значения $\zeta = 0{,}55$; $\psi = -0{,}0314$; $\theta = 14{,}05^\circ$ практически соответствуют положению равновесия поврежденного корабля, а ватерлиния A_2B_2 есть действующая ватерлиния в положении равновесия.

Проверим теперь устойчивость найденного положения равновесия. Ввиду того, что обводы корабля не претерпевают резких изменений в промежутке между ватерлиниями A_1B_1 и A_2B_2 и промежуток этот мал, определяем момент инерции ватерлинии A_1B_1, считая, что он не будет сильно отличаться от момента инерции ватерлинии A_2B_2.

Абсолютные координаты ЦТ F площади ватерлинии:

$$\lambda_0 = \frac{S_1\lambda_1 - s\lambda_s}{S_1 - s} = -\frac{3510}{1109} = -3{,}16 \ м.$$

$$\nu_0 = \frac{S_1\nu_1 - s\nu_s}{S_1 - s} = -\frac{56}{1109} = -0{,}05 \ м.$$

Моменты инерции площади действующей ватерлинии относительно центральных осей, параллельных осям $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$:

$$I_{\xi 0} = I_\xi - i_\xi - (S_1 - s)\,\nu_0^2 =$$

$$= 19\,300 - 1590 - 1109 \cdot 0{,}05^2 = 17\,700 \ м^4,$$

$$I_{\eta 0} = I_\eta - i_\eta - (S_1 - s)\,\lambda_0^2 =$$

$$= 745\,000 - 92\,000 - 1109 \cdot 3{,}16^2 = 642\,000 \ м^4,$$

$$I_{\xi\eta 0} = I_{\xi\eta} - i_{\xi\eta} - (S_1 - s)\,\lambda_0\nu_0 =$$

$$= 1520 - 20\,800 + 1109 \cdot 3{,}16 \cdot 0{,}05 = -19\,100 \ м^4.$$

Вычисляем угол, составляемый главными осями инерции площади действующей ватерлинии с осями $\Omega\xi$ и $\Omega\eta$:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2I_{\xi\eta 0}}{I_{\eta 0} - I_{\xi 0}} = \frac{-2 \cdot 19\,100}{642\,000 - 17\,700} = -0{,}061,$$

$$\cos 2\alpha = 0{,}998.$$

Главные моменты инерции:

$$I_1 = \frac{1}{2}(I_{\eta_0} + I_{\xi_0}) + \frac{1}{2\cos 2\alpha}(I_{\eta_0} - I_{\xi_0}) = \frac{1}{2}(642\,000 + 17\,700) +$$

$$+ \frac{1}{2 \cdot 0{,}998}(642\,000 - 17\,700) \approx 642\,000 \ м^4,$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(I_{\eta_0} + I_{\xi_0}) - \frac{1}{2\cos 2\alpha}(I_{\eta_0} - I_{\xi_0}) = \frac{1}{2}(642\,000 + 17\,700) -$$

$$- \frac{1}{2 \cdot 0{,}998}(642\,000 - 17\,700) \approx 17\,650 \ м^4.$$

Метацентрический радиус поврежденного корабля:

$$r = -\frac{I_{min}}{V_0 + v_1} = -\frac{17\,650}{4110 + 180} = -4{,}11 \ м.$$

Погружение центра величины под действующей ватерлинией:

$$\zeta_c = \zeta - X_c \sin\psi + Y_c \cos\psi \sin\theta + Z_c \cos\psi \cos\theta =$$
$$= 0{,}55 + 0{,}50 \cdot 0{,}0314 + 0{,}78 \cdot 0{,}259 +$$
$$+ 1{,}50 \cdot 0{,}966 = 2{,}22 \ м.$$

Возвышение центра тяжести над действующей ватерлинией

$$\zeta_g = \zeta - X_g \sin\psi + Y_g \cos\psi \sin\theta + Z_g \cos\psi \cos\theta =$$
$$= 0{,}55 + 0{,}52 \cdot 0{,}0314 + 0{,}10 \cdot 0{,}259 -$$
$$- 1{,}04 \cdot 0{,}966 = -0{,}40 \ м.$$

Возвышение метацентра над центром тяжести, т. е. метацентрическая высота поврежденного корабля:

$$h = -(\zeta_c + r - \zeta_g) = -(2{,}22 - 4{,}11 + 0{,}40) = 1{,}49 \ м.$$

Начальная метацентрическая высота поврежденного корабля положительна, и, следовательно, найденное положение равновесия его является устойчивым.

§ 53. РАСЧЕТ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ ПО СПОСОБУ В. В. СЕМЕНОВА ТЯН-ШАНСКОГО

Разработанный В. В. Семеновым Тян-Шанским метод расчета посадки и начальной остойчивости поврежденного корабля предполагает проведение его по способу последовательных приближений. Расчет непотопляемости в первом приближении основывается на следующих двух допущениях:

1) корабль и затопленный отсек считаются в пределах получающихся изменений осадки прямостенными;

2) для получающихся углов крена и дифферента считаются справедливыми метацентрические формулы остойчивости.

Вследствие наличия развала борта у современных кораблей расчет непотопляемости в первом приближении дает обычно несколько завышенные значения осадки, крена и дифферента и несколько заниженную остойчивость, т. е. результаты расчета содержат некоторый запас. Исключение представляют случаи, когда в результате затопления входит в воду палуба. Ввиду резкого сокращения площади действующей ватерлинии остойчивость поврежденного корабля может оказаться меньше, чем по данным первого приближения, а крен, дифферент и осадка — больше. Поэтому, если не вошла в воду палуба, можно ограничиваться расчетами первого приближения. Надобность во втором приближении возникает, если требуется точно определить положение равновесия поврежденного корабля и особенно в случаях входа палубы в воду.

Расчет посадки и начальной остойчивости поврежденного корабля в первом приближении

Расчет выполняется способом постоянного водоизмещения по формулам, приведенным в § 46, причем вычисление результатов затопления групп отделения производится методом эквивалентного отсека. Все расчеты производятся в табличной форме, удобной для практического применения и разработанной В. В. Семеновым Тян-Шанским. Ниже излагается общий ход расчета в первом приближении с сохранением обозначений, принятых автором.

В дальнейшем обозначено:

Для затопленных отделений

v — объем отделения (или группы отделений), определяемый с учетом коэффициентов проницаемости;

$\varkappa$ — коэффициент проницаемости;

x, y, z — координаты ЦТ объема v;

s — потерянная площадь ватерлинии с учетом коэффициента проницаемости при затоплении отделения (или группы их);

x_s и y_s — абсцисса и ордината центра тяжести площади s;

i и j — собственные моменты инерции площади s относительно продольной и поперечной оси с учетом коэффициента проницаемости.

Для неповрежденного корабля

D — вес корабля;

V — объемное водоизмещение по исходную ватерлинию;

T — осадка, соответствующая водоизмещению V;

S' — площадь исходной ватерлинии;

L — длина корабля по исходной ватерлинии;

x_0' — абсцисса центра тяжести площади S';

h — поперечная метацентрическая высота;

H — продольная метацентрическая высота.

Для поврежденного корабля

δT, $\delta T_н$, $\delta T_к$ — изменения осадки средней, носом и кормой, получающиеся в результате затопления;

θ_1 и ΔT — угол крена и диферент, получающиеся после затопления;

δh и δH — изменения поперечной и продольной метацентрических высот при затоплении;

$\delta(Dh)$ и $\delta(DH)$ — изменения коэффициентов поперечной и продольной остойчивости при затоплении;

h_1 и H_1 — поперечная и продольная метацентрические высоты поврежденного корабля;

$S = S' - s$ — площадь действующей ватерлинии поврежденного корабля;

x_0 — абсцисса центра тяжести площади S.

Целью расчета является определение посадки и остойчивости поврежденного корабля. Предварительно, если рассматривается групповое затопление, определяются элементы эквивалентного отсека по формулам:

$$v = \sum \varkappa_i v_i = \sum\nolimits_1; \tag{430}$$

$$x - x_0 = \frac{\sum \varkappa_i v_i (x_i - x_0)}{v} = \frac{\sum_2}{\sum_1}; \tag{431}$$

$$y = \frac{\sum \varkappa_i v_i y_i}{v} = \frac{\sum_3}{\sum_1}; \tag{432}$$

$$z = \frac{\sum \varkappa_i v_i z_i}{v} = \frac{\sum_4}{\sum_1}; \tag{433}$$

$$s = \sum \varkappa_i s_i = \sum\nolimits_5; \tag{434}$$

$$x_s - x_0' = \frac{\sum \varkappa_i s_i (x_{si} - x_0')}{s} = \frac{\sum_6}{\sum_5}; \tag{435}$$

$$y_s = \frac{\sum \varkappa_i s_i y_{si}}{s} = \frac{\sum_7}{\sum_5}; \tag{436}$$

$$i = \sum \varkappa_i i_i = \sum\nolimits_8; \tag{437}$$

$$j = \sum \varkappa_i j_i = \sum\nolimits_9, \tag{438}$$

где индекс i относится к различным отделениям. Вычисления удобно располагать в табличной форме, схема которой приведена в табл. 67. Индексы при знаках $\sum$ в формулах (430) — (438) соответствуют приведенным в табл. 67. В случае затопления одного отделения в таблице должна быть заполнена одна строчка. Если в числе отделений, входящих в рассматриваемую группу, окажутся отделения, закрытые сверху, то для них следует принять:

$$s_i = 0; \quad i_i = 0; \quad j_i = 0,$$

а объем v_i и соответственно координаты x_i, y_i, z_i необходимо вычислять до водонепроницаемой палубы или платформы, ограничивающей это отделение сверху, если только эта платформа расположена ниже аварийной ватерлинии.

Если в числе затопляемых отделений будут такие, которые затопляются преднамеренно для спрямления корабля, и среди них окажутся такие, уровень воды в которых будет ниже верхней ограничивающей палубы или платформы, то их следует рассматривать, как не сообщающиеся с забортной водой и принимать для них

$$s_i = 0; \quad i_i \neq 0; \quad j_i \neq 0.$$

Таблица 67

Вычисления элементов эквивалентного отсека

№ отделений	Наименование отделений	Коэффициент проницаемости $\varkappa_i$	Теоретический объем отделения v_i	Объем влившейся воды $\varkappa_i v_i = \text{III} \cdot \text{IV}$	Координаты ЦТ объема v			Моменты объема v		
					$x_i - x_0'$	y_i	z_i	$\varkappa_i v_i (x_i - x_0')$ V · VI	$\varkappa_i v_i y_i$ V · VII	$\varkappa_i v_i z_i$ V · VIII
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Суммы				$\sum_1$				$\sum_2$	$\sum_3$	$\sum_4$

№ отделений	Наименование отделений	Характеристики потерянной площади ватерлинии					$\varkappa_i s_i = \text{III} \cdot \text{XII}$	Статические моменты		$\varkappa_i i_i = \text{III} \cdot \text{XIII}$	$\varkappa_i j_i = \text{III} \cdot \text{XIV}$
		площадь	моменты инерции		координаты центра тяжести			$\varkappa_i s_i (x_{si} - x_0') =$ = XV · XVII	$\varkappa_i s_i y_{si} =$ =XVI · XVII		
		s_i	i_i	j_i	$x_{si} - x_0'$	y_{si}					
I	II	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
Суммы							$\sum_5$	$\sum_6$	$\sum_7$	$\sum_8$	$\sum_9$

14 Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

Если же эти отделения заполняются доверху, то для них нужно принимать:

$$s_i = 0; \quad i_i = 0; \quad j_i = 0.$$

Расчетная величина затопляемого объема для них должна соответствовать фактическому объему влившейся воды.

Величины коэффициентов проницаемости, входящих в формулы, приводятся в табл. 68.

Таблица 68

Коэффициенты проницаемости

Наименование отделений	Коэффициент проницаемости ϰ
Пустые междудонные пространства, бортовые отсеки и систерны	0,97
Помещения командного состава и команды	0,96
Погреба боезапасов	0,90
Машинные отделения больших кораблей	0,85
Машинные отделения малых кораблей	0,75
Котельные отделения	0,80
Склады снабжения и продовольственные запасы	0,70
Грузовые трюмы, угольные ямы	0,60

В особых случаях коэффициенты проницаемости определяются специальным расчетом.

Дальнейший расчет производится также в табличной форме, схема которой приводится в табл. 69 и 70. Таблицы составлены применительно к следующим расчетным формулам.

Площадь поврежденной ватерлинии:

$$S = S' - s. \tag{439}$$

Абсцисса ЦТ площади:

$$x_0 = x_0' - (x_s - x_0')\frac{s}{S}. \tag{440}$$

Изменение средней осадки:

$$\delta T = \frac{v}{S}. \tag{441}$$

Изменение поперечной метацентрической высоты:

$$\delta h = \frac{v}{V}\left[T + \frac{\delta T}{2} - z - \frac{i + s y_s^2\left(1 + \frac{s}{S}\right)}{v}\right]. \tag{442}$$

Новая метацентрическая высота:

$$h_1 = h + \delta h. \tag{443}$$

Изменение коэффициента поперечной остойчивости:

$$\delta(Dh) = \gamma v\left[T + \frac{\delta T}{2} - z - \frac{i + sy_s^2\left(1 + \frac{s}{S}\right)}{v}\right]. \tag{444}$$

Новый коэффициент поперечной остойчивости:

$$Dh_1 = Dh + \delta(Dh). \tag{445}$$

Изменение продольной метацентрической высоты:

$$\delta H = -\frac{j + s(x_s - x_0')^2\left(1 + \frac{s}{S}\right)}{V}. \tag{446}$$

Новая продольная метацентрическая высота

$$H_1 = H + \delta H. \tag{447}$$

Изменение коэффициента продольной остойчивости:

$$\delta(DH) = -\gamma\left[j + s(x_s - x_0')^2\left(1 + \frac{s}{S}\right)\right]. \tag{448}$$

Новый коэффициент продольной остойчивости:

$$DH_1 = DH + \delta(DH). \tag{449}$$

Угол крена:

$$\theta_1 = \frac{\gamma v y}{Dh_1}\left(1 + \frac{y_s}{y}\frac{s}{S}\right). \tag{450}$$

Диферент:

$$\Delta T = \frac{\gamma v(x - x_0')}{DH_1}L\left(1 + \frac{x_s - x_0'}{x - x_0'}\frac{s}{S}\right). \tag{451}$$

Изменение осадки носом:

$$\delta T_н = \delta T + \frac{\Delta T}{L}\left(\frac{L}{2} - x_0\right). \tag{452}$$

Изменение осадки кормой:

$$\delta T_к = \delta T - \frac{\Delta T}{L}\left(\frac{L}{2} + x_0\right). \tag{453}$$

В табл. 69 производится вычисление вспомогательных величин, а в табл. 70 вычисляются результаты затопления.

Каждому случаю затопления в табл. 69 и 70 соответствует одна строка, следовательно, количество строк таблицы должно соответствовать количеству рассматриваемых случаев затопления.

Водоизмещение корабля, получающееся в результате комбинации аварийного и преднамеренного затопления, равно:

$$D_1 = D + \gamma\sum v_i', \tag{454}$$

где v_i' — объемы воды в затопляемых преднамеренно отделениях.

Таблица 69

Вычисление вспомогательных величин

№ случаев	Исходные данные									Вычисление вспомогательных величин						
	v	$x - x_0'$	y	z	s	$x_s - x_0'$	y_s	i	j	$\frac{\Delta}{v} = \frac{\Delta}{\text{II}}$	$S = S' - \text{VI}$	$\frac{s}{S} = \frac{\text{VI}}{\text{XII}}$	$1 + \frac{s}{S} = 1 + \text{XIII}$	$v(x - x_0') = \text{II} \cdot \text{III}$	$vy = \text{II} \cdot \text{IV}$	$(x_s - x_0')\frac{s}{S} = \text{VII} \cdot \text{XIII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII

№ случаев	Вычисление вспомогательных величин										
	$(x_s - x_0')^2 = \text{VII}^2$	$y_s^2 = \text{VIII}^2$	$s(x_s - x_0')^2 \times \left(1 + \frac{s}{S}\right) = \text{VI} \cdot \text{XIV} \cdot \text{XVIII}$	$sy_s^2\left(1 + \frac{s}{S}\right) = \text{VI} \cdot \text{XIV} \cdot \text{XIX}$	$j + s(x_s - x_0')^2 \times \left(1 + \frac{s}{S}\right) = \text{X} + \text{XX}$	$i + sy_s^2 \times \left(1 + \frac{s}{S}\right) = \text{IX} + \text{XXI}$	$x_0 = x_0' - \text{XVII}$	$\frac{y_s}{y} = \frac{\text{VIII}}{\text{IV}}$	$\frac{x_s - x_0'}{x - x_0'} = \frac{\text{VII}}{\text{III}}$	$1 + \frac{y_s}{y}\frac{s}{S} = 1 + \text{XXV} \cdot \text{XIII}$	$1 + \frac{x_s - x_0'}{x - x_0'}\frac{s}{S} = 1 + \text{XXVI} \cdot \text{XIII}$
I	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII

Истинная метацентрическая высота, соответствующая кораблю, имеющему водоизмещение D_1 и характеризующая его поперечную остойчивость, равна:

$$h' = h_1 \frac{D}{D_1}, \tag{455}$$

где h_1 — метацентрическая высота, вычисленная способом постоянного водоизмещения по приведенным выше формулам.

Расчет посадки и начальной остойчивости поврежденного корабля во втором приближении

В основу расчета непотопляемости по способу Семенова Тян-Шанского во втором и последующих приближениях приняты следующие положения:

1. Расчет построен на принципе вычисления поправок к расчету первого приближения для величин, характеризующих посадку корабля, и на принципе вычисления заново величин, характеризующих остойчивость.

2. Расчет ведется способом постоянного водоизмещения, т. е. вес корабля и положение его центра тяжести считаются неизменными.

После вычисления посадки и остойчивости корабля в первом приближении вычисляются с помощью интегральных кривых В. Г. Власова (§ 15) элементы пловучести и начальной остойчивости для корабля и затопленного отсека отдельно для наклонной ватерлинии, параметры которой определены в первом приближении. Исходя из веса корабля и положения его центра тяжести, а также водоизмещения поврежденного корабля и положения его центра величины для наклонной ватерлинии первого приближения, определяются неуравновешенная сила и неуравновешенные моменты.

По найденной неуравновешенной силе определяется поправка к средней осадке, как для прямостенного корабля, и по неуравновешенным моментам определяются с помощью метацентрических формул поправки к углам крена и диферента. В случае группового затопления отделений вводится эквивалентный отсек так же, как и в расчете первого приближения.

Если положение ватерлинии второго приближения окажется недостаточно точным, должен быть выполнен расчет третьего приближения тем же способом, как и второго, причем ватерлиния второго приближения принимается за исходную. Практически, однако, бывает достаточно второго приближения, так как поправки при переходе к третьему приближению обычно оказываются достаточно малыми. Если же поправки вместо убывания возрастают, то это служит признаком, что корабль тонет.

При выполнении расчета второго приближения сохраняются те же обозначения, как и в расчете первого приближения, с нижеследующими дополнениями.

Таблица 70

Вычисление результатов затопления

№ случаев	Номера столбцов, из которых берутся вычисленные в табл. 69 величины										
	II	XV	XVI	V	XII	XXIV	XXVII	XXVIII	XXIII	XXII	XI
	v	$v(x-x_0')$	vy	z	S	x_0	$1+\frac{y_s}{y}\frac{s}{S}$	$1+\frac{x_s-x_0'}{x-x_0'}\frac{s}{S}$	$i+sy_s^2\left(1+\frac{s}{S}\right)$	$j+s(x_s-x_0')^2\left(1+\frac{s}{S}\right)$	$\frac{\Delta}{v}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

№ случаев											
	$\delta T=\frac{\text{II}}{\text{VI}}$	$\frac{\delta T}{2}=\frac{\text{XIII}}{2}$	$\frac{i+sy_s^2\left(1+\frac{s}{S}\right)}{v}=\frac{\text{X}}{\text{II}}$	$T+\frac{\delta T}{2}-z-\frac{i+sy_s^2\left(1+\frac{s}{S}\right)}{v}=$ $=T+\text{XIV}-\text{V}-\text{XV}$	$\delta h=\text{XII}\cdot\text{XVI}$	$h_1=h+\text{XVII}$	$\delta(Dh)=\text{II}\cdot\text{XVI}\cdot\gamma$	$Dh_1=Dh+\text{XIX}$	$\delta H=-\frac{j+s(x_s-x_0')^2\left(1+\frac{s}{S}\right)}{V}=$ $=-\frac{\text{XI}}{V}$	$H_1=H+\text{XXI}$	$\delta(DH)=-\gamma\cdot\text{XI}$
I	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII

№ случаев									
	$DH_1=DH+\text{XXIII}$	$0_1=\frac{\gamma\cdot\text{IV}\cdot\text{VIII}}{\text{XX}}$	$\Delta T=\frac{\gamma\cdot\text{III}\cdot\text{IX}}{\text{XXIV}}L$	$\frac{L}{2}-x_0=\frac{L}{2}-\text{VII}$	$\frac{L}{2}+x_0=\frac{L}{2}+\text{VII}$	$\frac{\Delta T}{L}\left(\frac{L}{2}-x_0\right)=$ $=\frac{\text{XXVI}\cdot\text{XXVII}}{L}$	$\frac{\Delta T}{L}\left(\frac{L}{2}+x_0\right)=$ $=\frac{\text{XXVI}\cdot\text{XXVIII}}{L}$	$\delta T_{н}=\text{XIII}+\text{XXIX}$	$\delta T_{к}=\text{XIII}-\text{XXX}$
I	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII	XXIX	XXX	XXXI	XXXII

Примечание. В столбцах I—XII вписываются данные, вычисленные в табл. 69.

Для затопленных отделений

v_1 — объем отделения или группы отделений по наклонную ватерлинию первого приближения с учетом коэффициентов проницаемости;

x_1, y_1 и z_1 — координаты центра тяжести объема v_1;

s_1 — проекция наклонной потерянной площади ватерлинии на плоскость XOY с учетом коэффициента проницаемости;

x_s и y_s — координаты центра тяжести площади s_1;

i_1 и j_1 — собственные моменты инерции площади s_1 относительно продольной и поперечной осей, параллельных осям ox и oy.

Для поврежденного корабля

$T_{⊗1}$ — осадка корабля на миделе в первом приближении;

$\delta T_{⊗2}$ — изменение осадки корабля на миделе во втором приближении;

$\delta\theta$ и $\delta\psi$ — изменение крена и дифферента корабля во втором приближении;

h_2 и H_2 — поперечная и продольная метацентрические высоты для второго приближения;

S_1' — проекция площади наклонной ватерлинии первого приближения;

x_{f_1}' и y_{f_1}' — координаты центра тяжести площади S_1';

$S_1 = S_1' - s_1$ — проекция площади поврежденной наклонной ватерлинии первого приближения на площадь XOY;

x_{f_1} и y_{f_1} — координаты центра тяжести площади S_1;

V_1' — погруженный объем корабля по наклонную ватерлинию первого приближения;

x_c', y_c' и z_c' — координаты центра величины объема V_1';

$V_1 = V_1' - v_1$ — погруженный объем корабля по наклонную ватерлинию первого приближения за вычетом объема затопленного отделения;

δV — неуравновешенный объем;

$V_2 = V = V_1 - \delta V$ — постоянный погруженный объем корабля для второго приближения, учитывающий только изменение осадки на миделе, но без учета поправок к крену и диференту;

x_{c_2}, y_{c_2} и z_{c_2} — координаты центра величины объема V_2;

δl и δb — плечи неуравновешенных моментов.

Задачей расчета непотопляемости во втором приближении является определение поправки к средней осадке $\delta T_{⊗2}$, поправок к углам наклонения $\delta\theta$ и $\delta\psi$ и характеристик остойчивости h_2 и H_2. Прежде всего необходимо определить элементы корабля для наклонной ватерлинии первого приближения. Для этого нужно иметь чебышевский корпус корабля и к нему интегральные кривые Власова ω, b и c (§ 15).

На чебышевском корпусе проводятся следы ватерлиний первого приближения, исходя из ее параметров:

$$T_{\otimes 1} = T + \delta T - x_0 \operatorname{tg}\psi_1 - y_0 \operatorname{tg}\theta_1, \tag{456}$$

где δT, θ_1 и x_0 берутся из расчета первого приближения;

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \frac{\Delta T}{L} \quad \text{и} \quad y_0 = -\frac{s y_s}{S}. \tag{457}$$

При проведении следов наклонной ватерлинии следует учитывать, что на i-ом шпангоуте точка пересечения следа ватерлинии и следа диаметральной плоскости будет располагаться от основной линии на расстоянии

$$T_i = T_{\otimes 1} + k_i \frac{L}{2} \operatorname{tg}\psi_1, \tag{458}$$

где k_i — чебышевский множитель данного шпангоута.

После проведения следов снимаются с корпуса и интегральных кривых ординаты y и y' проекции площади наклонной ватерлинии первого приближения на плоскость XOY для правого и левого бортов, а также ординаты интегральных кривых ω, ω', b, b', c, c' для правого и левого бортов. Съемка ординат с чебышевского корпуса и интегральных кривых производится так, как указано в § 15 (рис. 16). Снятые величины записываются в табл. 71 (столбцы IV, V, XV, XVI, XIX, XX, XXI и XXII) и затем производится вычисление необходимых сумм. Расчет элементов корабля для наклонной ватерлинии первого приближения производится по формулам с обозначениями применительно к табл. 71, составленной для 9 чебышевских шпангоутов.

Площадь проекции ватерлинии первого приближения на плоскость XOY

$$S_1' = \frac{L}{9} \sum\nolimits_1. \tag{459}$$

Координаты центра тяжести площади S_1'

$$x_{f_1}' = \frac{L}{2} \frac{\sum_2}{\sum_1}, \tag{460}$$

$$y_{f_1}' = \frac{1}{2} \frac{\sum_4}{\sum_1}. \tag{461}$$

Моменты инерции площади S_1':

$$I_x' = \frac{1}{3} \frac{L}{9} \sum\nolimits_6 \tag{462}$$

$$I_y' = \frac{L}{9} \left(\frac{L}{2}\right)^2 \sum\nolimits_3. \tag{463}$$

Центробежный момент инерции:

$$I_{xy}' = \frac{1}{2} \frac{L}{9} \frac{L}{2} \sum\nolimits_5. \tag{464}$$

Таблица 71

Вычисление характеристик корабля для ватерлинии первого приближения

№ шпангоутов	Чебышевские множители k	Квадраты чебышевских множителей k^2	Ординаты		$y + y' = IV + V$	$k(y + y') = II \cdot VI$	$k^2(y + y') = III \cdot VI$	Квадраты ординат		$y^2 - y'^2$	$k(y^2 - y'^2) = II \cdot XI$	Кубы ординат		Площади		$\omega + \omega' = XV + XVI$	$k(\omega + \omega') = II \cdot XVII$	Моменты площадей			
			правые y	левые y'				правые $y^2 = IV^2$	левые $y'^2 = V^2$			правые $y^3 = IV^3$	левые $y'^3 = V^3$	правые ω	левые ω'			правые b	левые b'	правые c	левые c'
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII
4	0,912	0,830																			
3	0,601	0,361																			
2	0,529	0,280																			
1	0,1679	0,028																			
0	0	0																			
1_1	—0,1679	0,028																			
2_1	—0,529	0,280																			
3_1	—0,601	0,361																			
4_1	—0,912	0,830																			
Суммы																					
Обозначения сумм					$\sum_1$	$\sum_2$	$\sum_3$			$\sum_4$	$\sum_5$	$\sum_6$				$\sum_7$	$\sum_8$	$\sum_9$		$\sum_{10}$	

Объем погруженной части корабля по наклонную ватерлинию первого приближения равен:

$$V_1' = \frac{L}{9}\left(\sum_7 - \frac{1}{2}\operatorname{tg}\theta_1 \sum_4\right). \qquad (465)$$

Статические моменты этого объема будут:
относительно плоскости миделя

$$V_1' x_{c_1}' = \frac{L}{9}\,\frac{L}{2}\left(\sum_8 - \frac{1}{2}\operatorname{tg}\theta_1 \sum_5\right); \qquad (466)$$

относительно диаметральной плоскости

$$V_1' y_{c_1}' = \frac{L}{9}\left(\sum_9 - \frac{1}{6}\operatorname{tg}\theta_1 \sum_6\right); \qquad (467)$$

относительно основной плоскости

$$V_1' z_{c_1}' = \frac{L}{9}\left[\sum_{10} - \operatorname{tg}\theta_1\left(\frac{T_{\otimes 1}}{2}\sum_4 + \frac{L}{4}\operatorname{tg}\psi_1 \sum_5 + \frac{1}{3}\operatorname{tg}\theta_1 \sum_6\right)\right]. \qquad (468)$$

Далее вычисляются элементы затопленного отсека для ватерлинии первого приближения. Для этого следует длину l затопленного эквивалентного отсека разбить на три равные части и построить четыре поперечных сечения отсека — два торцевых и два промежуточных. Для этих поперечных сечений следует построить тем же способом, как и для шпангоутов, интегральные кривые ω, b, c (§ 15). Если затопленный отсек не симметричен, то необходимо построить интегральные кривые отдельно для правого и левого бортов.

Проведя следы ватерлинии первого приближения на сечениях отсека, следует снять так же, как и для корабля, ординаты проекции потерянной площади ватерлинии y и y' и ординаты интегральных кривых отсека ω, ω', b, b', c и c'. Снятые величины вписываются в табл. 72 и производится вычисление необходимых сумм с учетом поправок на полусумму первого и последнего слагаемых, так как для затопленного отсека вычисления производятся по правилу трапеций.

Вычисление элементов затопленного отсека производится по следующим формулам.

Проекция потерянной площади ватерлинии на плоскость XOY равна:

$$s_1 = \varkappa \Delta l \sigma_1. \qquad (469)$$

Координаты центра тяжести площади s_1

$$x_{s_1} = X + \Delta l \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \qquad (470)$$

$$y_{s_1} = \frac{1}{2}\,\frac{\sigma_4}{\sigma_1}, \qquad (471)$$

где X — расстояние от миделя до ближайшей к корме торцевой переборки затопленного отсека с учетом знака (+ в нос, — в корму).

Моменты инерции площади s относительно ее центральной продольной оси:

$$i_1 = \frac{\varkappa}{3} \Delta l \sigma_6 - s_1 y_{s_1}^2 \tag{472}$$

относительно ее центральной поперечной оси:

$$j_1 = \varkappa \Delta l^3 \sigma_3 - s_1 (x_{s_1} - X)^2. \tag{473}$$

Центробежный момент инерции:

$$i_{01} = \varkappa \frac{\Delta l^2}{2} \sigma_5 - y_{s_1} (x_{s_1} - X) s_1. \tag{474}$$

Объем воды, влившейся в отсек, затопленный по ватерлинию первого приближения:

$$v_1 = \varkappa \Delta l \left(\sigma_7 - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta_1 \sigma_4 \right). \tag{475}$$

Статические моменты объема:

$$v_1 x_1 = v_1 X + \varkappa \Delta l^2 \left(\sigma_8 - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta \sigma_5 \right); \tag{476}$$

$$v_1 y_1 = \varkappa \Delta l \left(\sigma_9 - \frac{1}{6} \operatorname{tg} \theta_1 \sigma_6 \right); \tag{477}$$

$$v_1 z_1 = \varkappa \Delta l \left[\sigma_{10} - \operatorname{tg} \theta_1 \left(\frac{T_x}{2} \sigma_4 + \frac{\Delta l}{2} \operatorname{tg} \psi_1 \sigma_5 + \frac{1}{3} \operatorname{tg} \theta_1 \sigma_6 \right) \right], \tag{478}$$

где

$$T_x = T_{\otimes} + X \operatorname{tg} \psi_1. \tag{479}$$

Далее вычисляются элементы поврежденного корабля с учетом затопленного отсека.

Погруженный объем корабля:

$$V_1 = V_1' - v_1. \tag{480}$$

Координаты центра величины:

$$x_{c_1} = \frac{V_1' x_{c_1}' - v_1 x_1}{V_1}; \tag{481}$$

$$y_{c_1} = \frac{V_1' y_{c_1}' - v_1 y_1}{V_1}; \tag{482}$$

$$z_{c_1} = \frac{V_1' z_{c_1}' - v_1 z_1}{V_1}. \tag{483}$$

Проекция площади наклонной поврежденной ватерлинии на плоскость XOY:

$$S_1 = S_1' - s_1. \tag{484}$$

Таблица 72

Вычисление характеристик затопленного отсека для ватерлинии первого приближения

№ поперечных сечений i	$i^2 = I^2$	Ординаты		$y + y' = \text{III} + \text{IV}$	$i(y + y') = \text{I} \cdot \text{V}$	$i^2(y + y') = \text{II} \cdot \text{V}$	Квадраты ординат		$y^2 - y'^2 = \text{VIII} - \text{IX}$	$i(y^2 - y'^2) = \text{I} \cdot \text{X}$	Кубы ординат		Площади		$\omega + \omega' = \text{XIV} + \text{XV}$	$i(\omega + \omega') = \text{I} \cdot \text{XVI}$	Моменты площадей			
		правые y	левые y'				правые $y^2 = \text{III}^2$	левые $y'^2 = \text{IV}^2$			правые $y^3 = \text{III}^3$	левые $y'^3 = \text{IV}^3$	правые ω	левые ω'			правые b	левые b'	правые c	левые c'
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
Суммы																				
Поправки																				
Исправленные суммы Обозначения сумм				σ_1	σ_2	σ_3			σ_4	σ_5	σ_6				σ_7	σ_8	σ_9		σ_{10}	

Примечания. 1. Нулевое поперечное сечение соответствует переборке, расположенной ближе к корме.

2. Теоретическая шпация $\Delta l = \frac{l}{3}$.

Координаты центра тяжести площади S_1:

$$x_{f_1} = \frac{S' x'_{f_1} - s_1 x_{s_1}}{S_1}; \tag{485}$$

$$y_{f_1} = \frac{S' y'_{f_1} - s_1 y_{s_1}}{S_1}. \tag{486}$$

Моменты инерции площади S_1:
относительно центральной продольной оси

$$I_x = I'_x - i_1 - s_1 y^2_{s_1} - S_1 y^2_{f_1}; \tag{487}$$

относительно центральной поперечной оси

$$I_y = I'_y - j_1 - s_1 x^2_{s_1} - S_1 x^2_{f_1}. \tag{488}$$

Центробежный момент инерции

$$I_{xy} = I'_{xy} - i_{01} - s_1 x_{s_1} y_{s_1} - S_1 x_{f_1} y_{f_1}. \tag{489}$$

Моменты инерции площади самой поврежденной ватерлинии (а не проекции ее):
относительно центральной оси, параллельной плоскости XOZ

$$I_{x\alpha} \cong (1 + \mathrm{tg}^2\,\theta_1)^{3/2} I_x; \tag{490}$$

относительно центральной оси, перпендикулярной первой

$$I_{y\alpha} \cong (1 + \mathrm{tg}^2\,\theta_1)^{1/2} (I_y + 2\,\mathrm{tg}\,\theta_1\,\mathrm{tg}\,\psi_1\, I_{xy}). \tag{491}$$

Центробежный момент инерции

$$I_{xy\alpha} \cong (1 + \mathrm{tg}^2\,\theta_1) \quad (I_{xy} + \mathrm{tg}\,\theta_1\,\mathrm{tg}\,\psi_1\, I_x). \tag{492}$$

Главные центральные моменты инерции площади самой поврежденной ватерлинии

$$I_\xi \cong I_{x\alpha} - \frac{I^2_{xy\alpha}}{I_{y\alpha} - I_{x\alpha}}; \tag{493}$$

$$I_\eta \cong I_{y\alpha} + \frac{I^2_{xy\alpha}}{I_{y\alpha} - I_{x\alpha}}. \tag{494}$$

Неуравновешенное водоизмещение определяется по формуле:

$$\delta V = V_1 - V. \tag{495}$$

Изменение осадки на миделе равно:

$$\delta T_{\otimes_1} = \frac{\delta V}{S_1}. \tag{496}$$

Изменение координат центра величины от погружения на величину $\delta T_{\boxtimes 1}$:

$$\delta x_c = \frac{\delta V}{V}(x_{f1} - x_{c1}); \tag{497}$$

$$\delta y_c = \frac{\delta V}{V}(y_{f1} - y_{c1}); \tag{498}$$

$$\delta z_c = \frac{\delta V}{V}\left(T_{\boxtimes 1} + x_{f1}\,\mathrm{tg}\,\psi_1 + y_{f1}\,\mathrm{tg}\,\theta_1 + \frac{\delta T_{\boxtimes}}{2} - z_{c1}\right). \tag{499}$$

Координаты центра величины постоянного объема V

$$x_{c_2} = x_{c_1} + \delta x_c; \quad y_{c_2} = y_{c_1} + \delta y_c; \quad z_{c_2} = z_{c_1} + \delta z_c. \tag{500}$$

Плечи неуравновешенных моментов:

$$\delta l = (x_g - x_{c_2})\cos\psi_1 - (z_{c_2} - z_g)\sin\psi_1; \tag{501}$$

$$\delta b = -y_{c_2}\cos\theta_1 - (z_{c_2} - z_g)\sin\theta_1. \tag{502}$$

Возвышение центра тяжести над центром величины:

$$a_1 = \frac{(x_{c_2} - x_g)\,\mathrm{tg}\,\psi_1 + y_{c_2}\,\mathrm{tg}\,\theta_1 - (z_{c_2} - z_g)}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\theta_1}}. \tag{503}$$

Углы для вспомогательных тригонометрических функций:

$$\beta = \frac{I_{xy\alpha}}{I_{y\alpha} - I_{x\alpha}}; \tag{504}$$

$$\varphi = \arccos(\sin\psi_1 \sin\theta_1). \tag{505}$$

Изменения углов крена и дифферента:

$$\delta\psi = \frac{\cos\theta_1}{\sin^2\varphi}\left\{\frac{\delta l}{H_1}\sin\varphi - \frac{\sin\beta}{h_1}\Big[\delta b\cos\beta - \delta l\cos(\varphi - \beta)\Big]\right\}; \tag{506}$$

$$\delta\theta = \frac{\cos\psi_1}{\sin^2\varphi}\left\{\frac{\delta b}{h_1}\sin\varphi - \frac{\cos(\varphi - \beta)}{h_1}\Big[\delta b\sin\beta + \delta l\sin(\varphi - \beta)\Big]\right\}. \tag{507}$$

Углы крена и дифферента во втором приближении равны:

$$\psi_2 = \psi_1 + \delta\psi; \tag{508}$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \delta\theta. \tag{509}$$

Осадка на миделе во втором приближении:

$$\delta T_{\boxtimes 2} = \delta T_{\boxtimes 1} - x_f\delta\psi - y_f\delta\theta; \tag{510}$$

$$T_{\boxtimes 2} = T_{\boxtimes 1} + \delta T_{\boxtimes 2}. \tag{511}$$

§ 54. ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОВРЕЖДЕННОГО КОРАБЛЯ

Начальная остойчивость корабля с затопленными отсеками может быть определена по формулам § 46 и 47.

Остойчивость поврежденного корабля на больших углах крена характеризуется диаграммой статической остойчивости.

Способ пантокарен. [1] Способ пантокарен дает теоретически достаточно точный результат, но требует построения некоторых добавочных вспомогательных графиков.

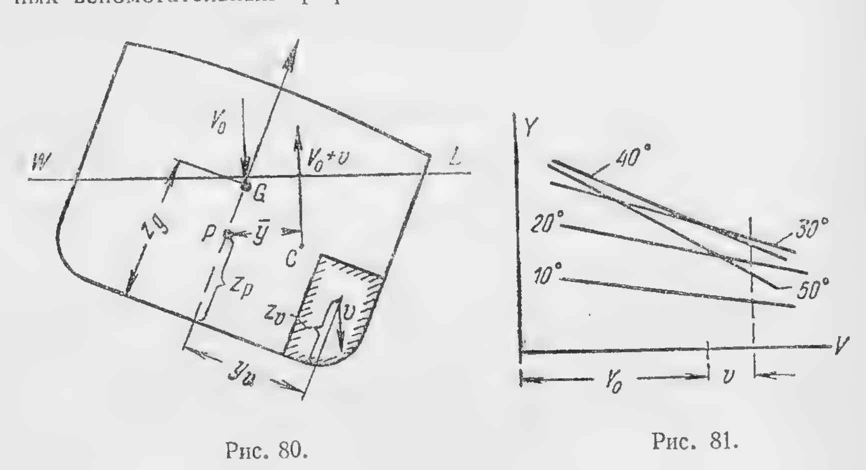


Рис. 80.

Рис. 81.

Если поврежденный отсек заполняется доверху так, что количество влившейся воды не изменяется при наклонении корабля (рис. 80), расчет диаграммы статической остойчивости может быть произведен по формуле:

$$l = \overline{Y} - \frac{V_0}{V_0+v}(Z_g - Z_p)\sin\theta - \frac{v}{V_0+v}[y\cos\theta + (z - Z_p)\sin\theta], \quad (512)$$

где v — объем воды, заполняющей поврежденное отделение;

y и z — координаты центра тяжести объема v;

V_0 — начальное водоизмещение судна;

l — плечо статической остойчивости, отнесенное к водоизмещению V_0+v;

$\overline{Y}$ — значения пантокарен, снятые с чертежа при водоизмещении V_0+v (рис. 81);

Z_p — возвышение полюса P над основной;

Z_g — возвышение над основной центра тяжести корабля, определяемое без учета влившейся воды.

---

[1] Способ предложен инж. В. А. Махиным (журнал „Судостроение", № 8, 1937). См. также § 36 и 37.

Если поврежденный отсек открыт сверху и сообщается с забортной водой, объем v влившейся воды и плечо r центра тяжести его оказываются функциями от угла крена (рис. 82):

$$l = \overline{Y} - \frac{V_0}{V_0 + v_1}(Z_g - Z_p) \sin \theta - \frac{v_1 r}{V_0 + v_1}, \qquad (513)$$

где

$v_1 = f_1(\theta)$ и $r = f_2(\theta)$.

Для нахождения неизвестных величин v_1 и r должны быть построены следующие вспомогательные кривые:

1) кривые грузового размера корабля при различных углах крена;

2) кривые погруженного объема отсека в зависимости от средней осадки корабля при разных углах крена;

3) кривые плеч центра тяжести влившейся воды относительно продольной оси, проходящей через полюс P, в функции от средней осадки корабля при разных углах крена (пантокарены для отсека).

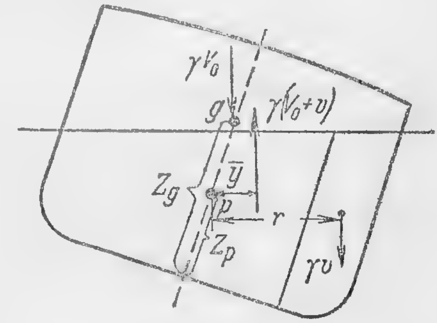


Рис. 82.

Величины водоизмещения при разных наклонениях, необходимые для построения грузовых размеров, берутся из расчетов остойчивости на больших углах крена, производящихся для разных водоизмещений. Соответствующие им величины осадок (понимая под этим осадки по диаметральной плоскости) могут быть определены непосредственным измерением по чертежу. Общий характер получаемого графика показан на рис. 83.

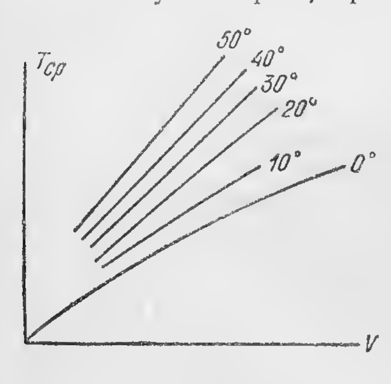


Рис. 83.

Кривые погруженного объема и пантокарены для отсека удобнее всего могут быть получены при помощи интегратора относительно той же оси, для которой сосчитаны моменты целого корабля (§ 36). При отсутствии интегратора расчет их может быть произведен аналитическим путем подобно тому, как это делается при расчете плеч остойчивости формы корабля по Матросову, Крылову и т. д.

Схема аналитического расчета приводится в табл. 73 и 74.

При расчете по этой схеме предполагается, что для прямого положения корабля известны как объем v_0 отсека, так и координаты y_0 и z_0 его центра тяжести (рис. 84).

При наклонении на угол θ объем погруженной части отсека увеличивается на величину Δv:

$$\Delta v = \frac{l_1}{2} \sum_0^{\theta} (y_1^2 - y_2^2)\,\Delta\theta; \tag{514}$$

$$v_1 = v_0 + \Delta v, \tag{515}$$

где y_1 и y_2 — входящие и выходящие ординаты для отсека, l_1 — длина его; величины Δv определяются по табл. 73.

Статический момент отсека определяется по формуле:

$$M = m_1 + m_2, \tag{516}$$

где m_1 — момент объема v_0 относительно оси, проходящей через полюс P:

$$m_1 = v_0\,[y_0 \cos\theta + (z_0 - Z_p)\sin\theta], \tag{517}$$

m_2 — момент добавочного объема Δv, определяемый формулой:

$$m_2 = \Delta v\, f \sin\theta + \left(\sum_0^{\theta} I \sin\theta\,\frac{\Delta\theta}{2}\right)\sin\theta + \left(\sum_0^{\theta} I \cos\theta\,\frac{\Delta\theta}{2}\right)\cos\theta, \tag{518}$$

где f — погружение полюса P под начальную ватерлинию $f = T - Z_p$; значения m_2 определяются по табл. 74.

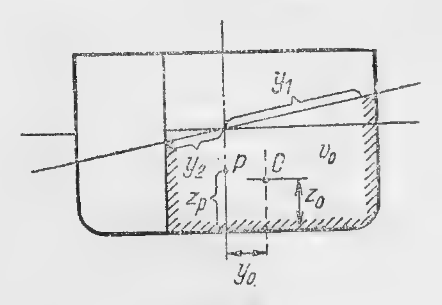


Рис. 84.

Плечи r определяются формулой:

$$r = \frac{M}{v_0 + \Delta v}. \tag{519}$$

По данным табл. 73 и 74, сосчитанным для трех или четырех средних осадок корабля, строятся кривые грузовых размеров и пантокарены для отсека. Общий характер получаемых графиков показан на рис. 85.

Определение средней осадки и количества влившейся в отсек воды при каждом наклонении корабля может быть произведено путем наложения на диаграмму грузового размера $V = F(T)$ кривой, ординаты которой дают сумму водоизмещения и объема воды, влившейся в отсек (рис. 86):

$$V_1 = V_0 + v_1. \tag{520}$$

Пересечение этих двух кривых определяет осадку корабля, а следовательно, и количество влившейся воды:

$$v_1 = V_1 - V_0. \tag{521}$$

Таблица 73

$T_{\text{ср}} =$ $v_0 =$ $l_1 =$ $f = T - z_p =$ $z_0 =$ $y_0 =$

		0°			10°			20°			30°			40°			50°		
		y	y^2	y^3	y	y^2	y^3	y	y^2	y^3	y	y^2	y^3	y	y^2	y^3	y	y^2	y^3
	Входящие ординаты y_1																		
	Выходящие ординаты y_2																		
I	$(y_1 + y_2)$; $(y_1^2 - y_2^2)$; $(y_1^3 + y_2^3)$																		
II	$I = \frac{1}{3}(y_1^3 + y_2^3) l_1$																		
III	$(y_1^2 - y_2^2)\frac{\Delta\theta}{4} l_1$																		
IV	$\sum$ III попарно																		
V	$\sum$ IV слева $= \Delta v$																		

По чертежу пантокарен для корабля и отсека снимаются пантокарены $\overline{Y}$ для водоизмещения $V_0 + v_1$ и плечи r для объема v_1; после этого по формуле (513) находятся плечи остойчивости l.

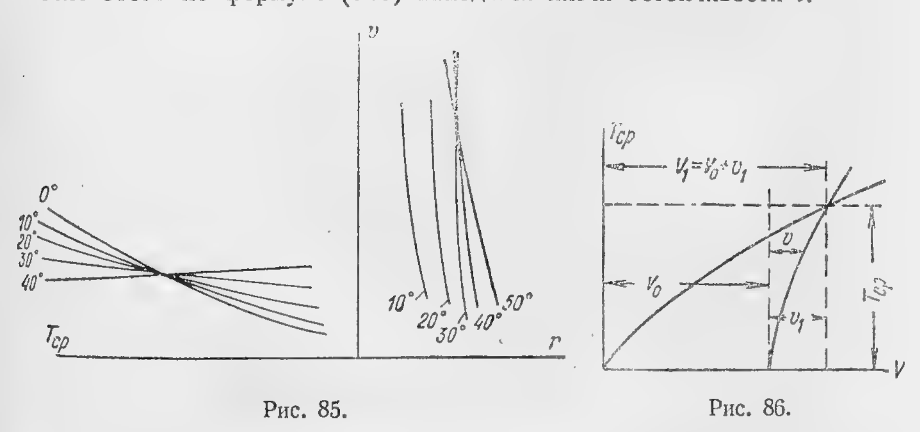


Рис. 85. Рис. 86.

Способ Ю. А. Шиманского. Формулы § 50 позволяют вычислить диаграмму статической остойчивости поврежденного корабля с учетом влияния изменения диферента на величину восстанавливающей пары.

Таблица 74

Расчет пантокарен поврежденного корабля

$\theta°$	I	$\sin\theta$	$I\sin\theta$	$\sum$ IV попарно	$\sum$ V сверху	VI · 0,0873	f	Δv	$f\Delta v$	$v_0(z_0 - Z_p)$	VII + X + XI	XII $\sin\theta$	$\cos\theta$	$I\cos\theta$	$\sum$ XV попарно	$\sum$ XVI сверху	XVII 0,0873	$v_0 y_0$	XVIII + XIX	XX $\cos\theta$	XIII + XXI	$v_0 + \Delta v$	$r = \frac{XXII}{XXIII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV
0°																							
10°																							
20°																							
30°																							
40°																							
50°																							

Построение диаграммы остойчивости производится по трем-четырем характерным точкам и линиям, касательным к кривой в этих точках (рис. 87).

Данные для построения точки B диаграммы остойчивости, т. е. точки пересечения ее с осью абсцисс, получаются в результате расчета посадки поврежденного корабля (§ 50).

Абсцисса точки B равна статическому крену θ_1.

Тангенс угла наклона касательной в этой точке диаграммы будет

$$r - a = \frac{A \sin \theta_1 + B \cos \theta_1}{V_0}, \tag{522}$$

где A и B — числитель и знаменатель формулы (302) § 50.

Далее следует построить точку A пересечения диаграммы с осью ординат и касательную к кривой. Имея точки A и B и наклоны касательных в них, можно приближенно предугадать угол θ_1, соответствующий точке C — максимуму диаграммы остойчивости, затем, задавшись этим углом, вычислить ординату соответствующей точки кривой и угол наклона касательной к ней в этой точке. Найдя точку C, ищут точку D, соответствующую закату диаграммы.

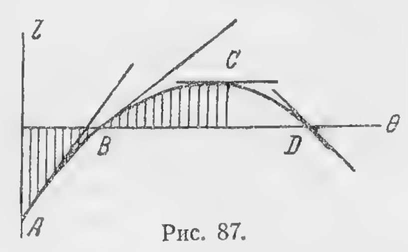


Рис. 87.

Общий порядок вычислений для каждой точки диаграммы таков:

1) Для заданного угла θ следует вычислить увеличение осадки ε и угол диферента ψ по приближенным формулам (301) и (303) § 50.

2) По полученным таким образом значениям величин ε и ψ и заданной величине θ следует построить положение корабля и по формулам (311) и (313) вычислить новые значения ε и ψ с учетом непрямостенности корабля и затапливаемого отсека.

3) Имея значения ε, ψ, θ, следует вычислить величину кренящего или выпрямляющего момента, действующего на корабль при посадке его, определяемую полученными координатами ε, ψ, θ по формулам:

$$m_{(\theta)} = A \cos \theta - B \sin \theta, \tag{523}$$

где A и B — числитель и знаменатель выражения (302). Полученные значения $m_{(\theta)}$ представят собой ординату точки диаграммы, имеющей абсциссой заданный угол θ, причем положительное значение $m_{(\theta)}$ соответствует кренящему моменту, а отрицательное — восстанавливающему.

4. Угол наклона касательной к диаграмме статической остойчивости в данной точке определяется формулой:

$$m'(\theta) = A \sin \theta + B \cos \theta. \tag{524}$$

Первый способ В. Г. Власова. Проф. В. Г. Власовым указан прием, с помощью которого удается при вычислении диаграммы ста-

тической остойчивости поврежденного корабля избежать ошибок, присущих применявшемуся ранее способу Матросова. При этом следует различать два случая: а) когда отсек закрыт сверху так, что уровень воды в нем не меняется при крене корабля; б) когда он открыт и сообщается с забортной водой. Пусть на рис. 88 WL — ватерлиния неповрежденного корабля; W_0L_0 — ватерлиния корабля с затопленным отсеком применительно к первому случаю в предположении, что корабль внешней парой удерживается в прямом положении; $W_\theta L_\theta$ — равнообъемная с W_0L_0 ватерлиния при крене θ.

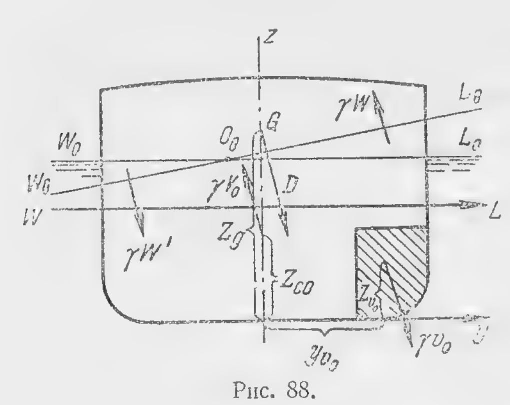


Рис. 88.

Введем обозначения:

D — вес неповрежденного корабля;

γV_0 — сила пловучести объема по ватерлинию W_0L_0;

γV — сила пловучести объема по ватерлинию WL;

γW и $\gamma W'$ — силы пловучести вошедшего в воду и вышедшего из воды равнообъемных клиньев;

γv_0 — вес принятой воды;

y_{v_0}, z_{v_0} — координаты ЦТ принятой воды;

Z_g — возвышение ЦТ над основной без учета влившейся воды;

Z_{c_0} — возвышение ЦВ корабля над основной для объема по ватерлинию W_0L_0.

При этом

$$V_0 = V + v_0. \tag{525}$$

Вследствие равнообъемности наклонения, силы γW и $\gamma W'$ образуют пару, дающую момент остойчивости формы. Силы D, γV_0 и γv_0 также образуют пару, дающую момент остойчивости веса и кренящий.

Суммарный момент при наклонении на угол θ:

$$M_\theta = M_{\phi\theta} + \mu_\theta, \tag{526}$$

где $M_{\phi\theta}$ — момент остойчивости формы, равный

$$M_{\phi\theta} = A_\theta \cos\theta + B_\theta \sin\theta. \tag{527}$$

$$A_\theta = \int_0^\theta I_\varphi \cos\varphi d\varphi; \quad B_\theta = \int_0^\theta I_\varphi \sin\varphi d\varphi. \tag{528}$$

Величина $M_{\phi\theta}$ может быть также определена при помощи пантокарен $M_{\phi\theta} = \gamma V_0 l_{\phi\theta}$, где $l_{\phi\theta}$ — плечо остойчивости формы для водоизмещения V_0 и крена θ (§ 36).

Момент μ_θ образован силами D, γV_0, γv_0 и равен

$$\mu_\theta = \gamma\,[(V_0 Z_{c_0} - V Z_g - v_0 Z_{v_0}) \sin\theta - v_0 y_{v_0} \cos\theta]. \qquad (529)$$

Во втором случае предполагается, что поврежденный отсек имеет свободную поверхность и сообщается с забортной водой, так что количество влившейся в него воды увеличивается при крене корабля в сторону отсека (рис. 89).

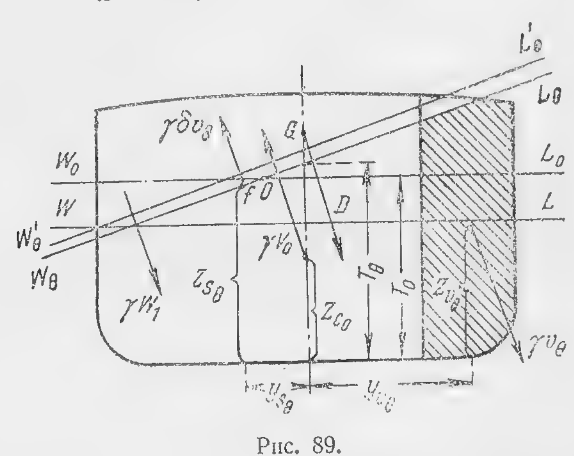


Рис. 89.

Ватерлиния W_0L_0 попрежнему соответствует той, при которой корабль будет плавать при наличии повреждения, если внешней парой удерживать его в прямом положении. Соответствующая ей осадка определится либо по грузовому размеру, либо для прямостенного судна и отсека формулой:

$$T_0 = T + \frac{v}{S - s}, \qquad (530)$$

где T — осадка по исходную ватерлинию WL;

v — количество влившейся воды по ватерлинию WL;

S — площадь исходной ватерлинии WL;

s — площадь свободной поверхности.

Примем далее обозначения:

v_θ — объем влившейся воды по наклонную ватерлинию $W_\theta L_\theta$, равнообъемную с ватерлинией W_0L_0.

δv_θ — добавочное количество влившейся при крене воды, определяемое формулой:

$$\delta v_\theta = v_\theta - v; \qquad (531)$$

$Y_{s\theta}$ и $Z_{s\theta}$ — координаты ЦТ f' действующей ватерлинии.

Восстанавливающий момент M_θ равен:

$$M_\theta = M_{\text{ф}\theta} + \mu'_\theta, \tag{532}$$

где $M_{\text{ф}\theta}$ — момент остойчивости формы, определяемый либо по формулам (527) и (528), либо по интерполяционным кривым для водоизмещения V_0.

Момент μ'_θ определится по формуле:

$$\mu'_\theta = \gamma \left[(V_0 Z_{c_0} - V Z_g - v_\theta z_{v\theta} + \delta v_\theta z_{s\theta}) \sin\theta - \right.$$
$$\left. - (v_\theta y_{v\theta} - \delta v_\theta y_{s\theta}) \cos\theta \right]. \tag{533}$$

При пользовании этим способом, расчет остойчивости формы на больших углах крена для построения пантокарен удобнее всего производить по методу Дарньи, так как при этом попутно определяются равнообъемные ватерлинии при разных наклонениях и осадках и положения ЦТ их f_θ.

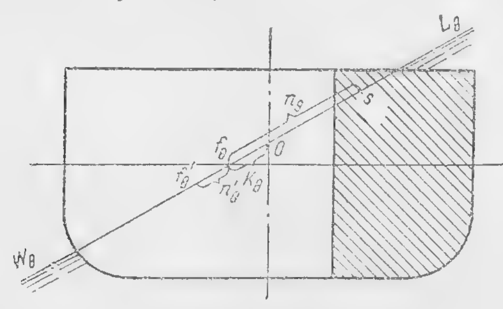


Рис. 90.

Помимо обычных пантокарен, следует построить еще дополнительные пантокарены, дающие величины средней осадки T_θ, равной ординате точки пересечения равнообъемной ватерлинии с плоскостью XOZ и положения ЦТ f_θ равнообъемной ватерлинии, определяемые отрезком K_θ (рис. 90). При помощи дополнительных пантокарен могут быть определены положения любой равнообъемной ватерлинии на корпусе и ЦТ f_θ для водоизмещения V_0.

Положение ЦТ f'_θ действующей ватерлинии за вычетом потерянной площади s определится по формуле:

$$n'_\theta = -\frac{s_\theta n_\theta}{S_\theta - s_\theta}, \tag{534}$$

где S_θ — площадь ватерлинии $W_\theta L_\theta$; s_θ — потерянная площадь; величины n_θ и n'_θ показаны на рис. 90. Координаты точки f'_θ, обозначенные $y_{s\theta}$ и $z_{s\theta}$, снимаются с чертежа.

Расчет значений μ_θ производится по схеме, приведенной в табл. 75.

Второй способ В. Г. Власова. Второй способ проф. В. Г. Власова, будучи несколько проще первого, обеспечивает такую же точность, но не дает возможности воспользоваться интерполяционными кривыми плеч остойчивости формы, построенными для неповрежденного корабля. По идее он основан на применении второго способа Крылова-Дарньи для построения равнообъемных ватерлиний поврежденного корабля (§ 34) и предполагает, что весовое водоизмещение корабля и положение его центра тяжести остаются постоянными при

всех его наклонениях. Затопленный отсек при этом предполагается открытым сверху и сообщающимся с забортной водой. Исходная ватерлиния W_0L_0 для производства расчета равнообъемных наклонений определяется в предположении, что поврежденный корабль удерживается внешним моментом в прямом положении.

Таблица 75

Вычисление диаграммы остойчивости поврежденного корабля

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV
$\theta°$	V_0	Z_{c0}	V_0Z_{c0}	V	Z_g	VZ_g	v_θ	$z_{v\theta}$	$v_\theta z_{v\theta}$	δv_0	$z_{s\theta}$	$\delta v_0 \cdot z_{s\theta}$	IV — VII — X + XIII	$\sin\theta$	XIV · XV	$y_{v\theta}$	$v_0 y_{v\theta}$	$y_{s\theta}$	$\delta v\, y_{s\theta}$	XVIII — XX	$\cos\theta$	XXI · XXII	μ'_0 = XVI — XXIII

В дальнейшем принимаются обозначения (рис. 91):

WL — ватерлиния неповрежденного корабля, соответствующая водоизмещению $V = \frac{D}{\gamma}$;

W_0L_0 — ватерлиния поврежденного корабля, соответствующая тому же объемному водоизмещению V в результате вычета из полного объема величины объема затопленного отсека;

v — объем воды в отсеке по ватерлинию WL с учетом коэффициента проницаемости;

C — центр величины по ватерлинию WL;

Z_c — ордината центра величины;

C_0 — центр величины по ватерлинию W_0L_0 с учетом вычета затопленного объема v;

y_{c_0} и z_{c_0} — координаты центра величины C_0;

Z_g — ордината центра тяжести;

Y_v и Z_v — координаты центра тяжести объема v;

δT — увеличение углубления при переходе от ватерлинии WL к ватерлинии W_0L_0;

S — полная площадь ватерлинии WL;

s — потерянная площадь ватерлинии WL, т. е. площадь сечения поврежденного отсека ватерлинией WL, умноженная на коэффициент проницаемости слоя отсека между ватерлиниями WL и W_0L_0;

y_s — координата центра тяжести площади s;

y_f — координата центра тяжести площади $S-s$ действующей ватерлинии.

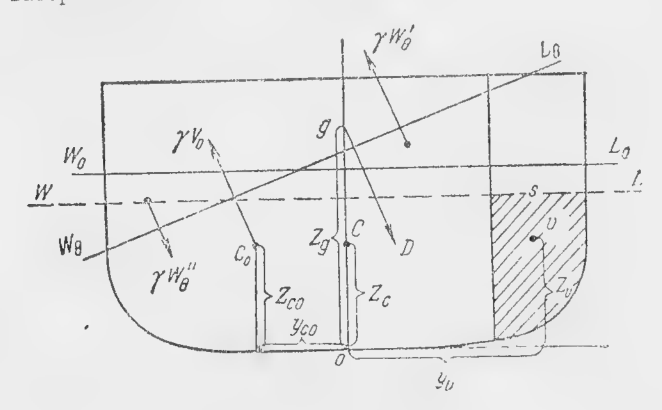


Рис. 91.

Увеличение углубления прямостенного корабля определяется по формуле:

$$\delta T = \frac{v}{S-s}. \tag{535}$$

Ордината центра тяжести площади ватерлинии равна:

$$y_f = -\frac{s y_s}{S-s}. \tag{536}$$

Координаты центра величины поврежденного корабля равны:

$$y_{c_0} = -\frac{v\,(y_v - y_f)}{V}; \tag{537}$$

$$Z_{c_0} = Z_c + \frac{v}{V}\left(T + \frac{\delta T}{2} - Z_v\right). \tag{538}$$

Момент статической остойчивости наклоненного на угол θ поврежденного корабля определяется по формуле:

$$M_\theta = \gamma M_\Phi - \gamma V\,(Z_g - Z_{c_0}) \sin\theta + \gamma V y_{c_0} \cos\theta, \tag{539}$$

Таблица 76

Расчет элементов наклонных ватерлиний поврежденного корабля

№ чебыш. шпанг.	$\varphi =$						$\varphi =$					
	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3	a	b	a^2	b^2	a^3	b^3
1												
2												
:												
$n-1$												
n												
$\sum$	$\sum a$	$\sum b$	$\sum a^2$	$\sum b^2$	$\sum a^3$	$\sum b^3$						
I	$\sum (a+b)$		$\sum (a^2-b^2)$		$\sum (a^3+b^3)$							
II	$S_\varphi = \frac{L}{n}(a+b)$											
III	s_φ											
IV	$S_\varphi - s_\varphi$											
V	$\eta_{s\varphi}$											
VI	$s_\varphi \eta_{s\varphi} = \mathrm{III} \cdot \mathrm{V}$											
VII	$\frac{L}{2n}\sum (a^2-b^2)$											
VIII	$m_\varphi = \mathrm{VII} - \mathrm{VI}$											
IX	$\eta_\varphi = \frac{\mathrm{VIII}}{\mathrm{IV}}$											
X	i_φ											
XI	$s_\varphi \eta_{s\varphi}^2$											
XII	$(S_\varphi - s_\varphi)\,\eta_\varphi^2$											
XIII	$\mathrm{X} + \mathrm{XI} + \mathrm{XII}$											
XIV	$\frac{1}{3}\,\frac{L}{n}\sum (a^3+b^3)$											
XV	$I_\varphi = \mathrm{XIV} - \mathrm{XIII}$											

где $M_ф$ — момент остойчивости формы поврежденного корабля, равный:

$$M_ф = \cos\theta \int_0^\theta I_\varphi \cos\varphi d\varphi + \sin\theta \int_0^\theta I_\varphi \sin\varphi d\varphi; \qquad (540)$$

здесь φ — текущий угол крена;

$W_\varphi L_\varphi$ — ватерлиния, соответствующая крену φ и отсекающая тот же действующий подводный объем, как и ватерлиния W_0L_0;

I_φ — центральный момент инерции действующей площади ватерлинии $W_\varphi L_\varphi$ относительно оси, параллельной x, вычисляемый по формуле:

$$I_\varphi = \frac{1}{3}\int_L (a_\varphi^3 + b_\varphi^3)\,dx - i_\varphi - s_\varphi \eta_{s\varphi}^2 - (S_\varphi - s_\varphi)\,\eta_\varphi^2; \qquad (541)$$

$$S_\varphi = \int_L (a_\varphi + b_\varphi)\,dx; \qquad (542)$$

$$\eta_\varphi = \frac{m_\varphi}{S_\varphi - s_\varphi}; \qquad (543)$$

$$m_\varphi = \frac{1}{2}\int_L (a_\varphi^2 - b_\varphi^2)\,dx - s_\varphi \eta_{s\varphi}. \qquad (544)$$

В формулах (541)—(544) приняты обозначения:

a_φ и b_φ — текущие (входящая и выходящая) ординаты вспомогательной ватерлинии $W'_\varphi L'_\varphi$, снятые от оси, проходящей через центр тяжести $F_{\varphi-\delta\varphi}$ действующей площади ватерлинии $W_{\varphi-\delta\varphi}L_{\varphi-\delta\varphi}$ (рис. 92);

S_φ — полная площадь вспомогательной ватерлинии $W'_\varphi L'_\varphi$;

s_φ — потерянная площадь ватерлинии $W'_\varphi L'_\varphi$, взятая с учетом коэффициента проницаемости;

$\eta_{s\varphi}$ — расстояние от центра тяжести площади s_φ до оси $F_{\varphi-\delta\varphi}$;

m_φ — статический момент площади $S_\varphi - s_\varphi$ относительно оси $F_{\varphi-\delta\varphi}$;

η_φ — расстояние от центра тяжести площади $S_\varphi - s_\varphi$ до оси $F_{\varphi-\delta\varphi}$;

i_φ — собственный момент инерции площади s_φ относительно оси, параллельной x.

Схема расчета величин η_φ и I_φ приведена в табл. 76.

Построение равнообъемных ватерлиний на чебышевском корпусе производится в соответствии с указаниями, подробно изложенными в § 34 при описании 2-го способа А. Н. Крылова (см. также рис. 42).

Способ построения аварийных пантокарен[1]**.** Этот способ основан на применении пантокарен поврежденного корабля. При расчете по этому способу для трех или двух осадок определяются центральные

---

[1]) Разработан Н. Я. Мальцевым в соавторстве с А. М. Розенфельд при участии Е. К. Гордеева.

моменты инерции площадей аварийных ватерлиний, за которые принимаются равнообъемные ватерлинии наклонений неповрежденного корабля, и по моментам инерции вычисляются моменты остойчивости формы поврежденного корабля. По полученным данным строятся пантокарены поврежденного корабля в функции от водоизмещения его до повреждения. Наличие таких пантокарен позволяет получить диаграмму аварийной остойчивости для любого предусмотренного стандартом нагрузки водоизмещения корабля.

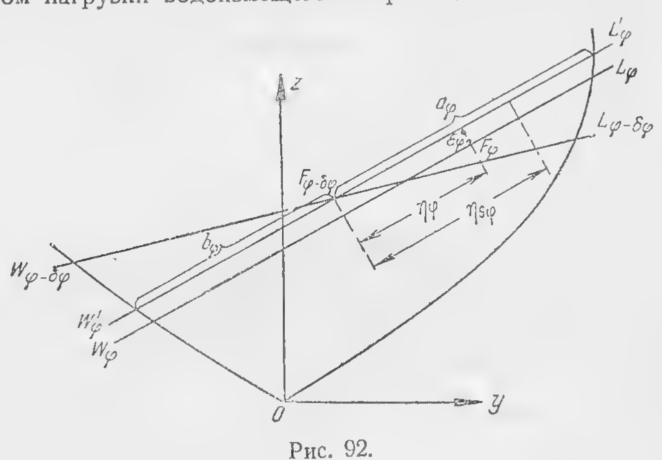


Рис. 92.

Для производства расчета надо располагать ранее выполненным расчетом плеч остойчивости формы и чебышевским корпусом для неповрежденного корабля, на котором должны быть нанесены действующие и вспомогательные ватерлинии, полученные при равнообъемном креновании корабля. В дальнейшем предполагается, что этот расчет выполнялся по способу Крылова-Дарньи. Кроме того, полезно иметь интегральные кривые ω, b и c для среднего сечения поврежденного отсека.

Момент инерции наклонной ватерлинии поврежденного корабля определяется выражением:

$$I_п = I_н - i - s\eta^2 - (S - s)\,\eta_1^2. \qquad (545)$$

Здесь $I_п$ — центральный момент инерции действующей площади ватерлинии поврежденного корабля;

$I_н$ — тот же момент инерции для той же ватерлинии, но для неповрежденного корабля;

s — потерянная площадь ватерлинии;

S — площадь ватерлинии неповрежденного корабля;

i — собственный момент инерции потерянной площади ватерлинии;

η — отстояние центра тяжести потерянной площади ватерлинии от центральной оси ватерлинии неповрежденного корабля;

η_1 — расстояние между центральными осями ватерлинии поврежденного и неповрежденного кораблей.

Величины $I_п$ и S для разных углов крена заимствуются из расчета наклонений неповрежденного корабля по методу Крылова-Дарньи. Прочие величины определяются через входящие и выходящие ординаты среднего сечения затопленного отсека, измеренные от центров тяжести ватерлиний неповрежденного корабля.

Потерянная площадь ватерлинии:

$$s = kl(a + b). \tag{546}$$

Здесь a — входящая,

b — выходящая ординаты среднего сечения отсека;

l — длина отсека;

k — коэффициент проницаемости.

Отстояние η

$$\eta = \frac{a - b}{2}. \tag{547}$$

Отстояние η_1:

$$\eta_1 = -\frac{m}{S - s} = -\frac{kl(a^2 - b^2)}{2[S - kl(a + b)]}. \tag{548}$$

Собственный момент инерции потерянной площади ватерлинии

$$i = \frac{kl}{12}(a + b)^3. \tag{549}$$

После подстановки значений выражение (545) приводится к виду

$$I_п = I_п - \frac{kl}{3}(a^3 + b^3) - \frac{k^2l^2}{4}\frac{(a^2 - b^2)^2}{[S - kl(a + b)]}. \tag{550}$$

Третьим членом правой части выражения (550) часто бывает возможно пренебречь.

Вычисление величин $I_п$ производится в табл. 77. Для заполнения табл. 77 следует нанести среднее сечение затопленного отсека на чебышевский корпус, по которому ранее производилось определение моментов остойчивости формы неповрежденного корабля или, наоборот, на среднее сечение отсека нанести все ватерлинии с чебышевского корпуса. И в том и в другом случае на чертеже находятся и отмечаются точками все центры тяжести действующих или вспомогательных ватерлиний неповрежденного корабля для всех накренений и осадок.

В табл. 77 вычисляются также величины

$$\frac{m\Delta\theta}{2} = \frac{kl\Delta\theta}{4}(a^2 - b^2), \tag{551}$$

необходимые для определения поправок на равнообъемность.

Моменты остойчивости формы поврежденного корабля определяются по формуле

$$M_{\theta п} = \cos\theta \int_0^\theta I_п \cos\varphi\, d\varphi + \sin\theta \int_0^\theta I_п \sin\varphi\, d\varphi. \tag{552}$$

Вычисления производятся в столбцах 1—13 табл. 78. В столбцах 14—16 той же таблицы вычисляются величины $V_п$ водоизмещений

Таблица 77

Расчет момента инерции поврежденного корабля

$l=$ $k=$ $kl=$ $\frac{kl}{3}=$ $\frac{k^2l^2}{4}=$ $\frac{\Delta\theta}{4}=$ $kl\frac{\Delta\theta}{4}=$

θ°	0			10			20			30			40			50			60			70			80			90		
V_i	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
a																														
b																														
a^3																														
b^3																														
a^3+b^3																														
$I_0=\frac{kl}{3}(a^3+b^3)$																														
a^2																														
b^2																														
a^2-b^2																														
$A=\frac{k^2l^2}{4}(a^2-b^2)^2$																														
$S_н$																														
$a+b$																														
$s=kl(a+b)$																														
$S_п=S_н-s$																														
$\Delta I_0=\frac{A}{S_п}$																														
$I_н$																														
$I_0'=I_0+\Delta I_0$																														
$I_п=I_н-I_0'$																														
$m\frac{\Delta\theta}{2}=\frac{kl\,\Delta\theta}{4}(a^2-b^2)$																														

поврежденного корабля, к которым относятся моменты остойчивости формы, по формуле:

$$V_п = V'_п - \int_0^\theta m\,d\theta, \qquad (553)$$

где

$$V'_п = V_н - v_0.$$

Здесь $V_н$ — водоизмещение неповрежденного корабля по ту осадку, для которой произведен расчет наклонений по методу Крылова-Дарньи;

v_0 — объем затопленного отсека по ватерлинию, отвечающую той же осадке ненакрененного корабля.

Величины v_0 определяются по формуле:

$$v_0 = kl\omega,$$

где ω — площадь среднего сечения затопленного отсека по ватерлинию, отвечающую данной осадке ненакрененного корабля.

По данным табл. 78 строятся пантокарены поврежденного корабля. При этом по оси абсцисс откладываются водоизмещения, определенные в столбце 16, а по оси ординат — соответствующие им моменты остойчивости формы, вычисляемые в столбце 13.

Дальнейший расчет, производящийся для определения плеч статической остойчивости поврежденного корабля, выполняется по форме табл. 79. Для этого необходимо предварительно определить элементы посадки поврежденного корабля, предполагая, что он удерживается внешней парой в прямом положении. Осадка T_1 корабля может быть определена известным путем пересечения грузовых размеров неповрежденного корабля и затопленного отсека. Определение осадки рекомендуется выполнить в самом начале расчета для того, чтобы надлежащим образом выбрать ватерлинии для расчета пантокарен. Для полученных осадок по интегральным кривым b и c определяются моменты:

$$\begin{aligned} vz_v &= klc, \\ vy_v &= klb, \end{aligned} \qquad (554)$$

где y_v и z_v — координаты центра тяжести затопленного объема,

v — затопленный объем до действующей ватерлинии ненакрененного корабля.

Положение центра величины поврежденного корабля определяется по формуле

$$z'_c = \frac{V_1 z_{c_1} - vz_v}{V_p}, \qquad (555)$$

где V_1 — водоизмещение неповрежденного корабля по аварийную осадку;

z_{c_1} — соответствующая этому водоизмещению ордината центра величины, снятая с кривых элементов теоретического чертежа;

V_p — расчетное водоизмещение корабля до повреждения.

Таблица 78

Расчет момента формы поврежденного корабля

$\theta°$	$I_п$	$\cos\theta$	$I_п \cos\theta$	Интегральн. $\Sigma(4)$	$A_\theta = \frac{\Delta\theta}{2}(5)$	$\sin\theta$	$I_п \sin\theta$	Интегральн. $\Sigma(8)$	$B_\theta = \frac{\Delta\theta}{2}(9)$	$A_\theta \cos\theta$ (3)·(6)	$B_\theta \sin\theta$ (7)·(10)	$M_{фп} =$ $= (11)+(12)$	$m\frac{\Delta\theta}{2}$	Интегральн. $\Sigma(14)$	$V_{п\theta} =$ $= V'_{пi} - (15)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0															
10															
20															
30															
40															
50															
60															
70															
80															
90															
0															
10															
20															
30															
40															
50															
60															
70															
80															
90															
0															
10															
20															
30															
40															
50															
60															
70															
80															
90															

Таблица 79

Расчет плеч статической и динамической остойчивости поврежденного корабля

Водоизмещение								I Стандартное		II Нормальное									III Полное							
$V_{pi}=$ $T_{pi}=$ $z_{gi}=$ $V_i=$ T_i Z_{ci} $v_i=kl\omega_i=$ $vz_{vi}=klc_i$ $vy_{vi}=klb_i$ $m_{вi}=V_i Z_{ci}-V_{pi} z_{gi}-vz_{vi}=$																										
$\theta°$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$m_{в_1}\sin\theta$	$vy_{v_1}\cos\theta$	$M_{в_1}=(4)-(5)$	$M_{ф_1}$	$M_{\theta_1}=(6)+(7)$	$l_{\theta_1}=\frac{M_{\theta_1}}{V_{p_1}}$	$\frac{\Delta\theta}{2}$ (9)	$l_{d_1}=$ инт. $\sum(10)$	$m_{в_2}\sin\theta$	$vy_{v_2}\cos\theta$	$M_{в_2}=(12)-(13)$	$M_{ф_2}$	$M_{\theta_2}=(14)+(15)$	$l_{\theta_2}=\frac{M_{\theta_2}}{V_{p_2}}$	$\frac{\Delta\theta}{2}$ (17)	$l_{d_2}=$ инт. $\sum(18)$	$m_{в_3}\sin\theta$	$vy_{v_3}\cos\theta$	$M_{в_3}=(20)-(21)$	$M_{ф_3}$	$M_{\theta_3}=(22)+(23)$	$l_{\theta_3}=\frac{M_{\theta_3}}{V_{p_3}}$	$\frac{\Delta\theta}{2}$ (25)	$l_{d_3}=$ инт. $\sum(26)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0																										
10																										
20																										
30																										
40																										
50																										
60																										
70																										
80																										
90																										
$\frac{\Delta\theta}{2}=0{,}0873$																										

Составляющая момента веса будет:

$$m_{\text{в}} = V_1 z_{c_1} - V_{\text{р}} z_g - v z_v. \qquad (556)$$

Момент статической остойчивости поврежденного корабля определяется по формуле

$$M_{\theta} = M_{\text{ф}} + m_{\text{в}} \sin\theta - v y_v \cos\theta. \qquad (557)$$

Плечо статической остойчивости равно:

$$l_{\theta} = \frac{M_{\theta}}{V_{\text{р}_1}}. \qquad (558)$$

Способ построения аварийных пантокарен обеспечивает такую же точность, как и оба способа В. Г. Власова. Преимуществом его является возможность построить без затраты дополнительного труда диаграмму статической остойчивости поврежденного корабля для любого водоизмещения, для которого известны координаты центра тяжести.

Для упрощения расчетов при построении диаграммы остойчивости поврежденного корабля в стадии предэскизного проектирования могут быть сделаны два дополнительных допущения:

1) поправка к моменту инерции площади ватерлинии на расстояние между центральными осями ватерлинии поврежденного и неповрежденного корабля ΔI_0 принимается пренебрежимо малой;

2) моменты формы поврежденного корабля в диапазоне между двумя расчетными осадками (из числа тех, по которым строились пантокарены неповрежденного корабля) предполагаются изменяющимися от водоизмещения по линейному закону.

Второе допущение позволяет найти момент остойчивости формы поврежденного корабля для интересующего исходного водоизмещения без построения пантокарен, пользуясь зависимостью

$$M_{\text{фп}} = \frac{M_{\text{фп}_1}(V_{\text{п}\theta_2} - V_{\text{р}}) - M_{\text{фп}_2}(V_{\text{п}\theta_1} - V_{\text{р}})}{V_{\text{п}\theta_2} - V_{\text{п}\theta_1}}, \qquad (559)$$

где $M_{\text{фп}1}$ — момент формы поврежденного корабля для первой из расчетных осадок, которой соответствует водоизмещение поврежденного корабля $V_{\text{п}\theta_1}$;

$M_{\text{фп}2}$ — тот же момент для второй из расчетных осадок, которой соответствует водоизмещение, поврежденного корабля $V_{\text{п}\theta_2}$;

$V_{\text{р}}$ — расчетное водоизмещение, для которого определяется момент остойчивости формы $M_{\text{фп}}$ поврежденного корабля.

Весь расчет в этом случае укладывается в одну таблицу, форма которой приведена в табл. 80.

Таблица 80

Расчет плеч статической остойчивости поврежденного корабля

	$0°$	$0°$		$10°$		$20°$		$30°$		$40°$		$50°$		$60°$		$70°$		$80°$	
	V_i	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	a																		
	b																		
	a^2																		
	b^2																		
	a^2-b^2																		
	a^3																		
	b^3																		
	a^3+b^3																		

	$\theta°$	$I_п$	$I_0=\frac{kl}{3}(a^3+b^3)$	$I_п=I_н-I_0=$ $=$ II $-$ III	$\cos\theta$	$I_п\cos\theta$	Интегральная $\sum$ VI	$A_\theta=\frac{\Delta\theta}{2}$ VII	$\sin\theta$	$I_п\sin\theta$	Интегральная $\sum$ X	$B_\theta=\frac{\Delta\theta}{2}$ XI	$A_\theta\cos\theta$ V $\times$ VIII	$B_\theta\sin\theta$ IX $\times$ XII	$M'_{фп}$ XIII $+$ XIV	$m\frac{\Delta\theta}{2}=$ $=\frac{kl\Delta\theta}{4}(a^2-b^2)$	Интегральная $\sum$ XVI	$V_{пэ}=V'_{п0}-$XVII	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	
$l=$ $k=$ $kl=$ $\frac{kl}{3}=$ $\frac{kl\Delta\theta}{4}=$ $\frac{\Delta\theta}{2}=0{,}0873$ $V_{н1}=$ $T_1=$ $\omega_1=$ $v_{01}=kl\omega_1=$ $V'_{п01}=V_{н1}-v_{01}=$ $V_{н2}=$ $T_2=$ $\omega_2=$ $v_{02}=kl\omega_2=$ $V'_{п02}=V_{н2}-v_{02}=$																			

	$\theta°$	$V_{п\theta_2}$	$V_{п\theta_1}$	$V_р-V_{п\theta_1}$	$V_{п\theta_2}-V_р$	II $-$ III	$M'_{фп_2}$	$M'_{фп_1}$	IV $\times$ VII	V $\times$ VIII	IX $+$ X	$M_{фп}=\frac{XI}{VI}$	$\sin\theta$	$m_в\sin\theta$	$\cos\theta$	$vy_v\cos\theta$	$M_в=$ $=$ XIV $-$ XVI	$M_\theta=$ $=$ XII $+$ XVII	$l_\theta=\frac{XVIII}{V_р}$
$V_р$ V_1 Z_{c1} Z_g $vy_v=klb=$ $vz_v=klc=$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX
$m_в=V_1Z_{c1}-V_pz_g-vz_v=$																			

§ 55. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЛИН ОТСЕКОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПЕРЕБОРОК НА МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ СУДАХ

По имеющемуся теоретическому чертежу производится расчет масштаба Бонжана до палубы переборок для 20 равноотстоящих шпангоутов и изготовляется специальный чертеж его, совмещенный с чертежом боковой проекции корпуса. При изготовлении чертежа рекомендуется принимать масштаб длин 1/200 н. в. и масштаб высот 1/25 н. в.

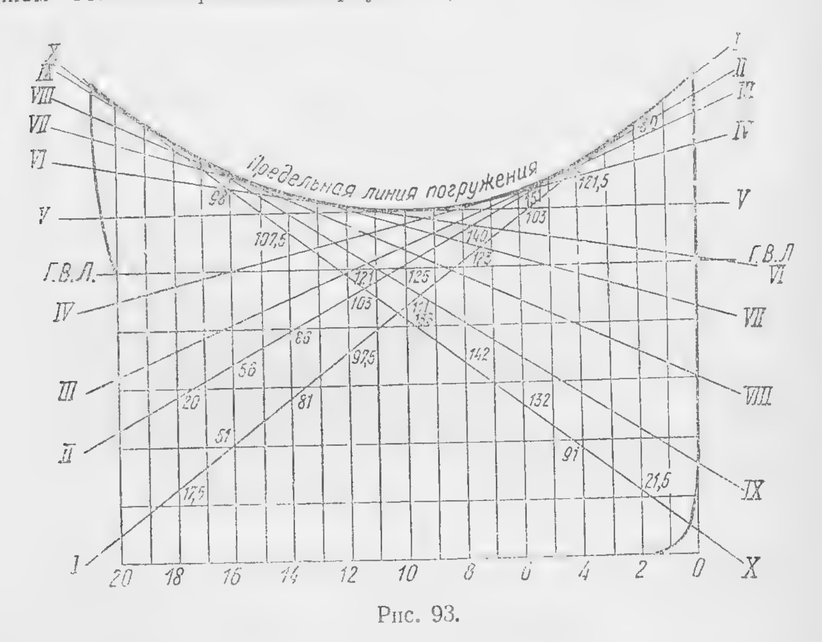


Рис. 93.

Палубой переборок здесь считается самая верхняя палуба, до которой доводятся водонепроницаемые переборки.

Параллельно линии палубы переборок, на 76 *мм* ниже ее верхней кромки, проводится на чертеже масштаба Бонжана предельная линия погружения.

К этой предельной линии погружения проводятся касательные ватерлинии так, чтобы они по возможности были наклонены одна к другой на равные углы; всего проводится около 10 ватерлиний, соответствующих различным возможным предельным погружениям судна при затоплении соответствующих его отсеков (рис. 93).

Далее по масштабу Бонжана снимаются величины площадей шпангоутов в местах пересечения их с наклонными ватерлиниями и записываются в соответствующие графы и столбцы табл. 81.

Таблица 81

Вычисление величины предельных объемов отсеков и абсцисс их центра тяжести

Элементы для расчетов	Множители плеч $\mp k_i$	№ касательных ватерлиний: I		II		:		IX		X	
$L =$ $x_{c0} =$ $(L:20) =$ $V_0 x_{c0} =$ $(L:20)^2 =$ $V_0 =$		площади шпангоутов I ω_i	I $\omega_i k_i$	площади шпангоутов IIω_i	II $\omega_i k_i$			площади шпангоутов IX ω_i	IX $\omega_i k_i$	площади шпангоутов X ω_i	X $\omega_i k_i$
№ шпангоутов, корма, нос: 0	+10										
:	:										
10	0										
:	:										
19	−9										
20	−10										
Суммы											
Поправки $\frac{(0)+(20)}{2}$											
Исправленные суммы $\sum$											
$V_j = \frac{L}{20}\sum \omega_i$ $M_j = \left(\frac{L}{20}\right)^2 \sum k_i \omega_i$ $v_j = V_j - V_0$ $m_j = M_j - M_0$ $x_{v_j} = \frac{m_j}{v_j}$											

Исправленная сумма величин площадей шпангоутов для каждой касательной ватерлинии, умноженная на величину шпангоутного расстояния, дает объем V_j погруженного по данную ватерлинию судна.

Разность между объемом V_j и подводным объемом V_0 корабля при осадке по грузовую дает предельную величину объема вливщейся в затопленный отсек воды. Она соответствует минимальному объему этого отсека при 100% проницаемости.

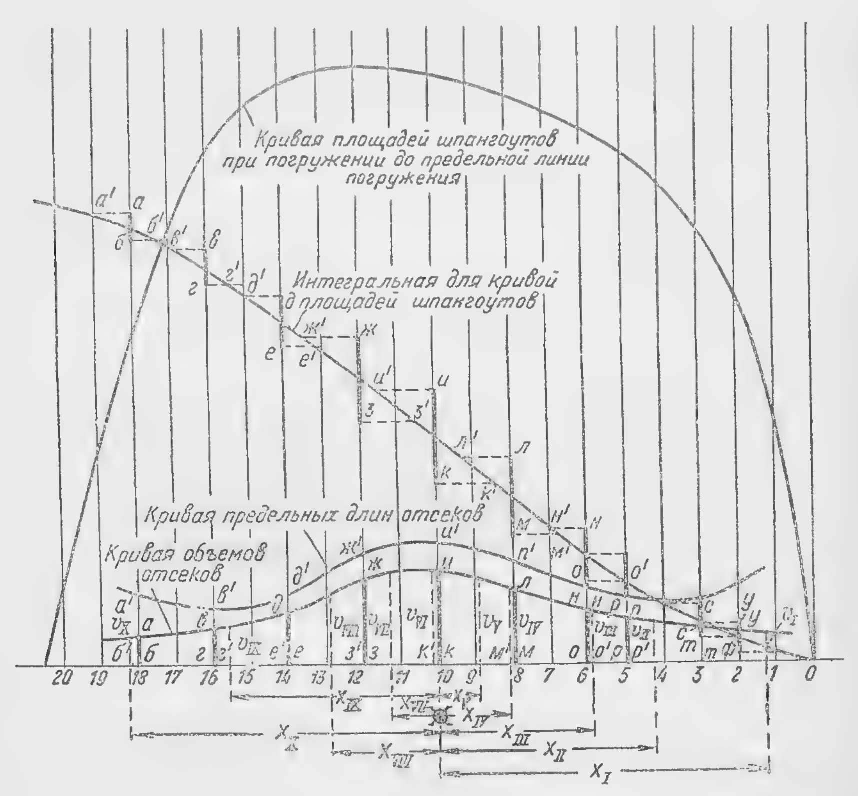


Рис. 94.

Величина статического момента M_j объема судна, погруженного по данную касательную ватерлинию относительно миделевого сечения, получается в результате умножения на квадрат шпангоутного расстояния исправленной суммы произведений площадей шпангоутов на соответствующие множители плеч (табл. 81).

Отстояние от миделевого сечения (абсцисса) x_{vj} центра тяжести затопленного отсека, имеющего объем v_j, определится по формуле:

$$x_{vj} = \frac{M_j - M_0}{V_j - V_0} = \frac{m_j}{v_j}, \qquad (560)$$

где M_0 — статический момент объемного водоизмещения при осадке по исходную (грузовую) ватерлинию.

$$M_0 = V_0 x_{c0}. \tag{561}$$

Величины V_0 и x_{c0} берутся из данных расчетов элементов плавучести и начальной остойчивости.

Затем в произвольно выбранном масштабе от основной линии строятся кривые: а) площадей шпангоутов до предельной линии погру-

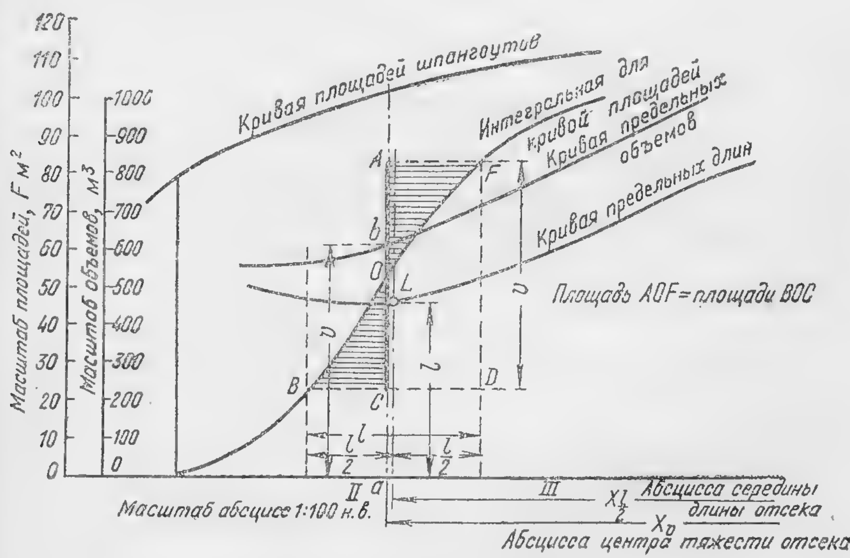


Рис. 95.

жения; б) интегральная кривая к кривой площадей шпангоутов; в) по данным табл. 81, кривая предельных объемов затопляемых отсеков (рис. 94).

Площади шпангоутов по предельную линию погружения берутся по масштабу Бонжана, а интегральная кривая к кривой площадей строится в том же масштабе, как и кривая предельных объемов.

Абсциссы ординат этой последней кривой приняты равными абсциссам центров тяжести их и берутся, равно как и самые ординаты, по данным табл. 81.

Нахождение предельных длин затопляемых отсеков выполняется графическим способом, как показано на рис. 95.

Пусть отрезок ab равен ординате кривой предельных объемов в любой ее точке с абсциссой x_v. Для нахождения длины отсека отрезок ab перемещается в такое положение его AC относительно интегральной для кривой площадей, при котором заштрихованные на рис. 95 площади AOF и BOC равны между собой. Тогда искомая

предельная длина отсека будет равна отрезку $l = BD$. Принимая значение l за ординату кривой предельных длин, а абсциссу середины длины отрезка BD за абсциссу кривой предельных длин, можно построить точку L искомой кривой.

В результате повторения указанного построения для ряда точек получается кривая предельных длин затопленных отсеков при проницаемости 100%.

Для получения кривой допустимых длин отсеков, полученные значения длин l умножаются на коэффициенты средней проницаемости и на факторы деления. Способы определения этих последних множителей сообщаются в курсах по проектированию судов и в материалах Морского Регистра.

§ 56. НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Различается надводная и подводная непотопляемость подводных лодок. Надводной непотопляемостью называется способность подводной лодки оставаться на плаву с положительной остойчивостью при затоплении отсека прочного корпуса и прилегающих к нему систерн главного балласта.

Под термином „подводная непотопляемость" понимается возможность самостоятельного перехода получившей аварию подводной лодки в надводное положение путем продувания на глубине сжатым воздухом соответствующего объема неповрежденных систерн главного балласта.

Расчет надводной непотопляемости может быть выполнен различными методами. Ниже приводится описание схемы расчета непотопляемости по методу выходящих объемов, разработанному П. Г. Гойнкисом и Д. Л. Гармашевым и по методу равнообъемных ватерлиний, предложенному Ю. А. Шиманским.

Метод выходящих объемов исходит из равновесия лодки в подводном положении и рассматривает всякое другое положение, как переход ее из подводного положения путем продувания систерн главного балласта и приема груза.

В основу расчета продольных наклонений подводной лодки по этой схеме приняты формулы:

$$V_1 = D - P - \sum v_i; \tag{562}$$

$$V_1 x_1 = (D - P)\, x_б - \sum v_i x_i, \tag{563}$$

где V_1 — оставшийся после повреждения запас пловучести, равный объему выходящей из воды части корпуса;

x_1 — отстояние ЦТ объема V_1 от миделя;

D — полное подводное водоизмещение, включая объем главного балласта;

P — объемное водоизмещение удиферентованной для погружения подводной лодки;

$D-P$ — объем главного балласта, равный запасу пловучести удиферентованной для погружения подводной лодки;

$x_б$ — отстояние ЦТ главного балласта от миделя;

v_i — объем воды, влившейся в поврежденный отсек или цистерну.

x_i — отстояние ЦТ объема v_i от мидель-шпангоута.

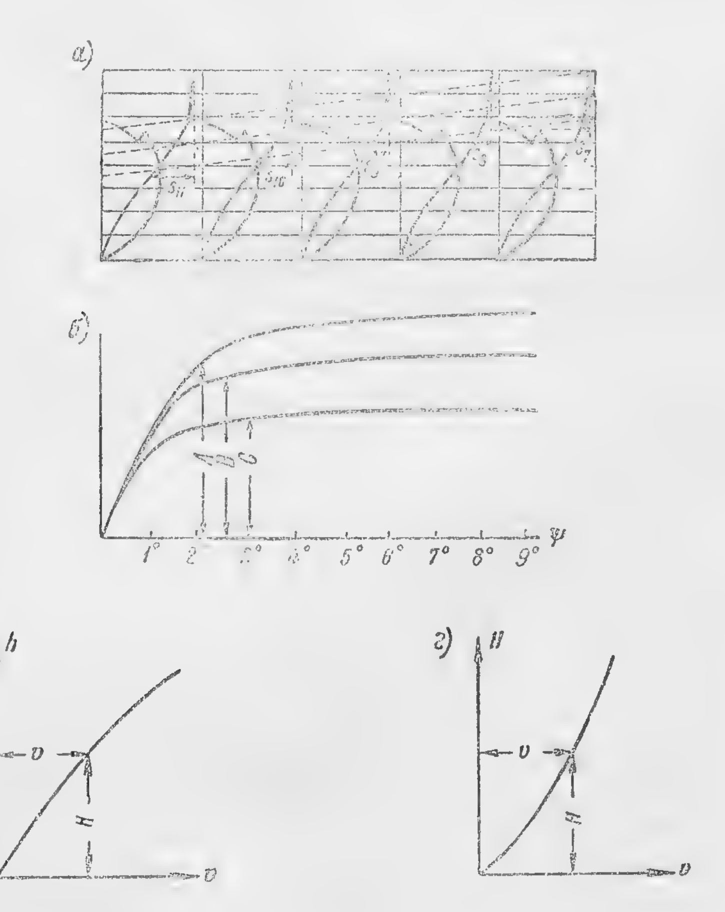


Рис. 96.

Каждому углу наклонения ψ и каждому значению средней осадки T соответствуют определенные значения V_1 и V_1x_1 и, наоборот, каждой паре величин V_1 и V_1x_1 отвечают определенные ψ и T. Это позволяет построить диаграмму, с помощью которой по заданным V_1 и V_1x_1 могут быть быстро определены ψ и T.

Для получения этой диаграммы необходим масштаб Бонжана, построенный с учетом объема выступающих частей. Накладывая на масштаб Бонжана вычерченную на прозрачной кальке сетку параллельных ватерлиний под углом ψ, снимают для каждой ватерлинии ординаты вышедших из воды площадей, как показано на рис. 96а, изображающем участок масштаба Бонжана. Схема вычисления объемов V_1 и моментов их V_1x_1 для данного наклонения ψ и ряда осадок T приводится в табл. 82.

Таблица 82

Расчет диаграммы непотопляемости подводной лодки

$\psi =$										
		$T_1 =$				$T_2 =$				$T_3 =$
№ шпангоутов	Множители	Площади носовых шпангоутов $s_н$	Площади кормовых шпангоутов $s_к$	Разности площадей $s_н - s_к$	Произведения II · V	Площади носовых шпангоутов $s_н$	Площади кормовых шпангоутов $s_к$	Разности площадей $s_н - s_к$	Произведения II · IX	
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0—20	10	s_0	s_{20}	$s_0 - s_{20}$						
1—19	9	s_1	s_{19}	$s_1 - s_{19}$						
2—18	8	⋮	⋮	⋮						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						
10	0	s_{10}	—							
Суммы		$\sum' s_i$			$\sum'_1$					
Поправки		$\frac{1}{2}(s_0 + s_{20})$								
Испр. суммы		$\sum s_i$			$\sum_1$					
Объемы		$V = \frac{L}{20} \sum s_i$								
Моменты		$M = \left(\frac{L}{20}\right)^2 \sum_1$								

Таблиц, подобных приведенной, должно быть столько, сколько необходимо иметь расчетных углов дифферента для данной подводной лодки. Обычно наибольшие углы дифферента принимают равными 9°, а промежуточные значения углов берутся с интервалами через 1,5°.

Общее количество таблиц при этом равно 13. По результатам вычислений в указанных таблицах строится диаграмма непотопляемости, изображенная на рис. 97.

По оси абсцисс диаграммы откладываются значения моментов $V_1 x_1$, а по оси ординат величины V_1. На диаграмме строятся два семейства кривых: кривые $V_1 = f(V_1 x_1)$ при $\psi = \text{const}$ или кривые равных углов диферента $\psi = \text{const}$ и кривые тех же величин при $T = \text{const}$, или кривые равной осадки $T = \text{const}$. Ввиду того, что принятый в расчетах интервал угла диферента 1,5° слишком велик, следует с помощью графического интерполирования построить промежуточные кривые с интервалами 0,5°. Для этого следует провести на диаграмме непотопляемости три или четыре произвольных прямых, подобных

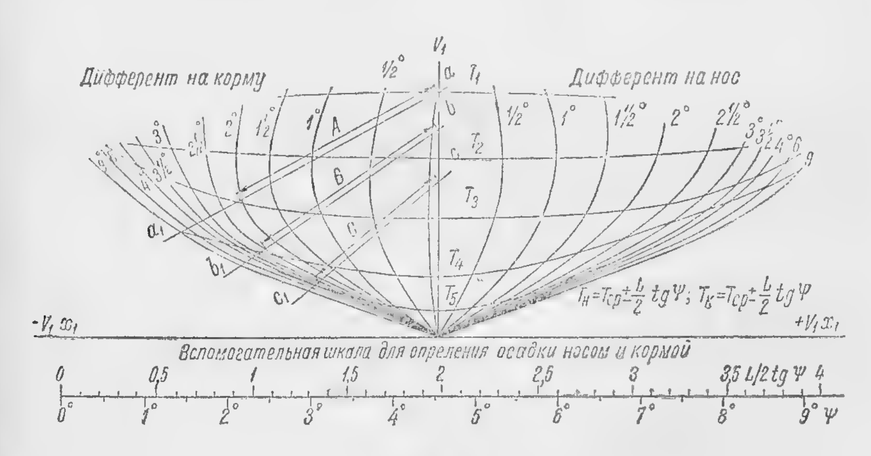


Рис. 97.

aa_1, bb_1, cc_1 (рис. 97) и изобразить их как интерполяционные кривые на рис. 96б, где абсциссы равны углам диферента, а ординаты отрезкам A, B, C, до пересечения прямых aa_1, bb_1, cc_1 с кривыми $\psi = \text{const}$. Снимая затем с полученных кривых ординаты, соответствующие желаемым промежуточным ψ, можно получить кривые $\psi = \text{const}$ с любыми интервалами.

Для быстрого нахождения осадок подводной лодки носом и кормой служит вспомогательная шкала внизу диаграммы (рис. 97), где даются значения $\frac{L}{2}\operatorname{tg}\psi$ для ряда величин ψ.

Осадка носом или кормой будет

$$T_н = T + \frac{L}{2}\operatorname{tg}\psi, \tag{564}$$

$$T_к = T - \frac{L}{2}\operatorname{tg}\psi. \tag{565}$$

Данные, необходимые для вычисления величин $\sum v_i$ и $\sum v_i x_i$, а также $D - P$ и x_0, приводятся в справочной табл. 83, помещаемой обычно рядом с эскизом расположения отсеков подводной лодки. Пользуясь табл. 83, вычисляют по формулам (562) и (563) величины вышедшего из воды объема V_1 и момента его $V_1 x_1$, считая разрушенные отсеки заполненными. На диаграмме непотопляемости (рис. 97) наносится точка, соответствующая найденным величинам вышедшего объема и его момента, и по кривым $\psi = \text{const}$ и $T = \text{const}$ находятся отвечающие данному варианту

Таблица 83

Справочная таблица

Наименование	Отсеки прочного корпуса						Систерны главного балласта									
	I	II	III	IV	V	VI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Всего
Объемы нетто																$D - P$
Момент от $\otimes$																$(D - P)x_б$
Момент от киля																

затопления величины ψ, T, а по формулам (564) и (565) вычисляются $T_н$ и $T_к$.

В большинстве случаев для подводных лодок, имеющих малый запас пловучести, полученного первого приближения вполне достаточно. Если же разрушенные отсеки не заполняются доверху и часть отсека оказывается расположенной выше аварийной ватерлинии, следует перейти ко второму приближению, вычислив $\sum v_i$ и $\sum v_i x_i$ по эту ватерлинию.

При исследовании непотопляемости подводной лодки, потерпевшей аварию при плавании с открытыми кингстонами систерн главного балласта, необходимо определять количество воды в каждой систерне в зависимости от глубины погружения ее нижней части под ватерлинией. В этом случае следует воспользоваться дополнительными вспомогательными графиками, причем для решения задачи потребуется несколько приближений.

Одним из дополнительных графиков является кривая объема влившейся воды в систерну в функции от высоты ее уровня h, т. е.

грузовой размер для каждой балластной систерны (рис. 96в). Далее следует воспользоваться зависимостями:

$$p = 10\left(\frac{v_0}{v_0 - v} - 1\right), \tag{566}$$

$$H = h + p, \tag{567}$$

где H — глубина погружения нижней части систерны под ватерлинией;
v_0 — полный объем систерны;
v — объем влившейся воды;
p — давление воздуха в систерне;
h — высота уровня воды в систерне.

По кривой $v = f(h)$ и зависимостям (566) и (567) рассчитывается график $v = f(H)$ (рис. 96г), по которому может быть быстро определен объем влившейся воды при каждом положении подводной лодки.

Метацентрическая высота поврежденной подводной лодки может быть определена по формуле

$$h_1 = a_1 + \frac{\Sigma v_i z_i - V_1 Z_1}{P} + \frac{I}{P} - \frac{i}{P}, \tag{568}$$

где a_1 — возвышение ЦВ прочного корпуса над центром тяжести;
V_1 — вышедший из воды объем после повреждения в предположении, что действием внешней пары подводная лодка удерживается в прямом положении;
Z_1 — возвышение над основной ЦТ объема V_1;
v_i — объем продутых и заполненных водой отсеков и систерн при повреждении, причем $v_i < 0$ при заполнении и $v_i > 0$ при продувании отсека;
z_i — возвышение над основной ЦТ объемов v_i;
I — момент инерции площади действующей ватерлинии;
i — момент инерции площади свободной поверхности.

Угол крена подводной лодки может быть определен по метацентрической формуле

$$0^\circ = 57{,}3\,\frac{\Sigma v_i y_i}{P h_1}. \tag{569}$$

При значениях угла крена больших 7—8° следует произвести построение диаграммы статической остойчивости. Кренящее действие затопленных отсеков может быть определено, исходя из смещения от диаметральной плоскости центра тяжести подводной лодки на величину

$$y_g = \frac{\Sigma v_i y_i}{P}. \tag{570}$$

При расчете надводной непотопляемости подводной лодки по методу равнообъемных ватерлиний входящие в воду и выходящие из воды сравнительно малые объемы корпуса и моменты

этих объемов вычисляются непосредственно, а не как разности больших объемов и их моментов. Пусть какое-либо отделение подводной лодки затоплено забортной водой; требуется найти новое поло-

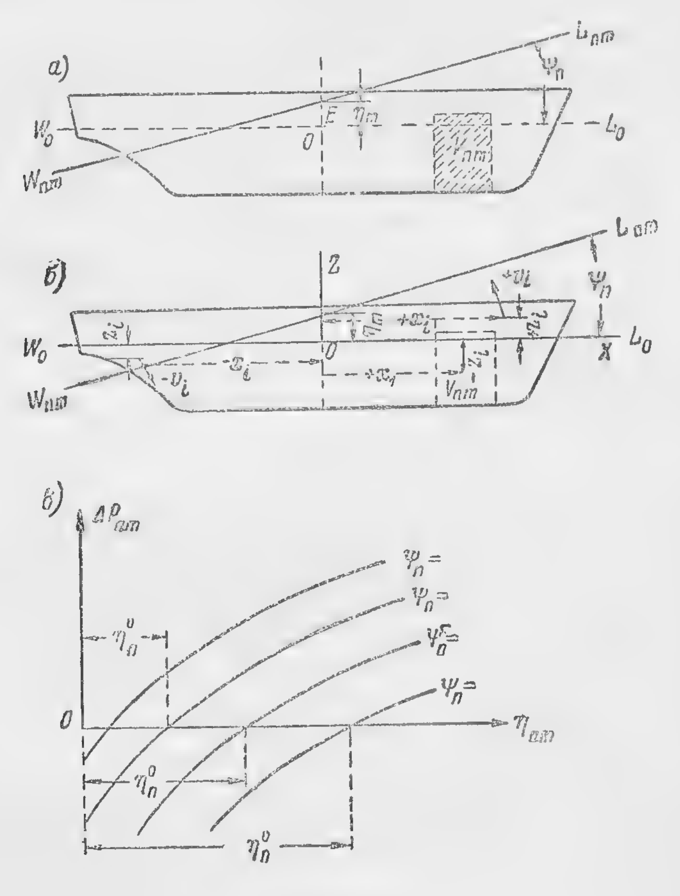


Рис. 98.

жение действующей ватерлинии и соответствующую ей продольную остойчивость (рис. 98а).

Положение ватерлинии определяется двумя параметрами: углами наклона ватерлинии ψ_n к первоначальной грузовой ватерлинии W_0L_0 и отстояниями η_{nm} точек E пересечения аварийной ватерлинии со следом мидель-шпангоута до точки O пересечения его с первоначальной ватерлинией.

На теоретическом чертеже лодки проводятся несколько параллельных ватерлиний, наклоненных на произвольный угол ψ_n и определяемых параметрами $\eta_{1n}, \eta_{2n}, \ldots, \eta_{mn}$. Для каждой из этих ватерлиний вычисляется по чертежам суммарный объем $\sum v_i$ вошедших в воду

и вышедших из воды частей корпуса и наружных устройств, причем входящим объемам приписывается знак плюс, а выходящим знак минус. Вычисляются также объемы залитых забортной водой частей водонепроницаемого корпуса V_{nm} при рассматриваемых ватерлиниях (рис. 98б). Значения неуравновешенных объемов Δp_{nm}, отвечающие рассматриваемым ватерлиниям $W_{nm}L_{nm}$, определятся по формуле:

$$\Delta p_{nm} = \sum\nolimits_{nm} v_i - V_{nm}. \qquad (571)$$

По найденным значениям Δp_{nm} строится кривая Δp_{nm} в функции от параметров η_{mn}, показанная на рис. 98в. Точка пересечения этой кривой с осью абсцисс определяет значение параметра η_n°, отвечающего равнообъемной ватерлинии $\Delta p_{nm} = 0$, проведенной под заданным углом ψ_n.

Проведя эту ватерлинию, можно вычислить отвечающий ей неуравновешенный момент сил, действующих на подводную лодку, пользуясь выражением:

$$\Delta M_{nm} = \left(\sum\nolimits_{nm} v_i x_i - V_{nm} x_1\right) \cos\psi_n + \left(\sum\nolimits_{nm} v_i z_i + V_{nm} z_1 - Pa - \sum i_i\right) \sin\psi_n. \qquad (572)$$

Здесь ΔM_{nm} неуравновешенный (или восстанавливающий) момент, v_i — входящие в воду (+) и выходящие из воды (—) объемы корпуса и его выступающих частей (рис. 98б); x_i, z_i — координаты центров тяжести объемов v_i со знаками плюс вверх и в нос и минус — вниз и в корму; V_{nm} — объем залитого водой отделения; x_1, z_1 — координаты ЦТ этого объема; координата z_1 со знаком минус, если центр тяжести объема V_{nm} находится ниже исходной ватерлинии; P — исходное водоизмещение подводной лодки; i_i — моменты инерции свободных уровней в систернах, не сообщающихся с забортной водой; a — возвышение центра тяжести над центром величины подводной лодки в ее исходном состоянии

$$a = z_g - z_c. \qquad (573)$$

По данным вычисления указанным способом неуравновешенных моментов ΔM_{nm} для ряда равнообъемных ватерлиний, определяемых разными значениями углов диферента, строится кривая изменения этих моментов в функции от угла диферента, показанная на рис. 99а сплошной линией. Кривая эта аналогична диаграмме статической остойчивости поврежденного корабля с той разницей, что в данном случае она относится к продольным наклонениям. Точка O_1 пересечения построенной кривой с осью абсцисс определяет угол ψ_0°, отвечающий углу диферента поврежденной подводной лодки при положении ее равновесия. На этой же диаграмме полезно построить

кривую равнообъемных параметров в функции от углов диферента ψ_n, пользуясь данными построения кривых на рис. 98в.

Найденные указанным путем значения параметров ψ_0° и η_0°, определяющие положение ватерлинии равновесия поврежденной подвод-

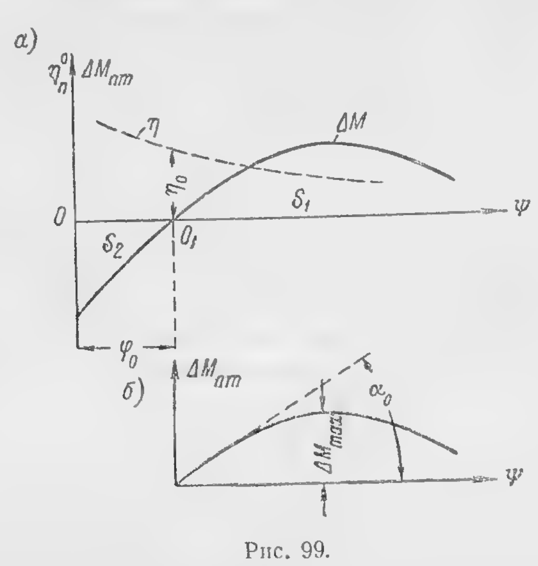


Рис. 99.

ной лодки, следует проверить, вычислив для этой ватерлинии значения Δp и ΔM. Если эти значения не окажутся достаточно малы, то положение ватерлинии следует уточнить, используя для этого имеющиеся кривые рис. 98в и 99а.

Начало координат диаграммы продольной остойчивости может быть перенесено в точку O_1 пересечения кривой с осью абсцисс. Полученная кривая (рис. 99б) представляет диаграмму продольной остойчивости поврежденной подводной лодки, ординаты которой равны выпрямляющим моментам, отвечающим различным углам диферента лодки, которые отсчитываются от положения равновесия. Начальная метацентрическая высота поврежденной подводной лодки может быть получена по выражению

$$(R-a)_0 = \frac{1}{57{,}3} \cdot \frac{1}{P} \quad \frac{k_1}{k_2} \operatorname{tg} \alpha_0, \tag{574}$$

где $(R-a)_0$ — продольная метацентрическая высота;

P — водоизмещение лодки, для которого определяется метацентрическая высота; обычно принимается исходное водоизмещение;

$\operatorname{tg} \alpha_0$ — тангенс угла наклона касательной к кривой (рис. 99б);

k_1, k_2 — масштабы для моментов и углов диаграммы (рис. 99б), например $k_1 = 10$ и $k_2 = 0{,}1$, если при построении кривой принималось 1 *см* = 10 *тм* и 1 *см* = 0,1°.

Предельный, статически действующий диферентующий момент, который способна выдерживать подводная лодка, равен

$$M_{пр} = \Delta M_{max}, \quad (575)$$

где ΔM_{max} определяется значением максимальной ординаты кривой.

Площадь, ограничиваемая осью абсцисс и верхней ветвью диаграммы, характеризует запас динамической продольной остойчивости поврежденной подводной лодки. Для того, чтобы лодка выдержала мгновенное затопление рассматриваемого отделения, должно соблюдаться неравенство

$$S_1 > S_2,$$

где S_1 — площадь, ограниченная верхней ветвью кривой рис. 99а,
S_2 — площадь, ограниченная начальной нижней ветвью кривой и осью абсцисс.

Для подводных лодок вычисляются таблицы непотопляемости, подобные применяемым для надводных кораблей.

ГЛАВА V

СПУСК НА ВОДУ

§ 57. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Спуск — передвижение построенного до некоторой степени готовности судна со стапеля в воду, по принципу скольжения твердого тела по наклонной плоскости под действием собственного веса.

Спуск может быть продольный, когда судно движется параллельно своей диаметральной плоскости, и поперечный, или боковой, когда судно движется параллельно плоскости миделя. Продольный спуск может производиться вперед кормой или вперед носом. При спуске кормой вперед, вследствие того, что кормовая часть корабля часто бывает несколько полнее носовой, все явления спуска наступают раньше, кроме того, скорость движения корабля в четвертом периоде быстрее уменьшается, поэтому такой спуск более распространен. В дальнейшем будет рассматриваться спуск кормой вперед, однако все выводы будут одинаково относиться и к спуску носом вперед.

§ 58. ЭЛЕМЕНТЫ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА

Спусковое устройство состоит из подвижной части (салазок), связанной с судном, и неподвижной части (фундамента), по которой перемещается в воду судно вместе с салазками.

На рис. 100 обозначены основные элементы движущейся и неподвижной частей спускового устройства при продольном спуске, необходимые для исследования спуска с точки зрения теории корабля.

Основные характеристики подвижной части спускового устройства:

α — угол уклона киля по отношению к горизонту;

c — возвышение киля над линией спусковых дорожек в плоскости шпангоута, проходящего через центр тяжести;

L_1 — длина передней части спускового устройства, считая от поперечной плоскости, проходящей через центр тяжести;

L_2 — длина задней части спускового устройства, считая от той же плоскости;

b — суммарная ширина всех полозьев;

L_0 — длина поверхности соприкосновения полозьев со спусковыми дорожками; при сплошных полозьях

$$L_0 = L_1 + L_2.$$

Основные характеристики неподвижной части спускового устройства:

β — угол уклона спусковых дорожек по отношению к горизонту;

T_0 — глубина воды на пороге;

λ — длина подводной части спусковых дорожек.

Угол уклона β спусковых дорожек может быть постоянный, прогрессивно-возрастающий и прогрессивно-убывающий. Наиболее распространены стапели с постоянным уклоном. Переменный уклон образуется по дуге круга большого радиуса в пределах от 5000 до 15 000 *м*.

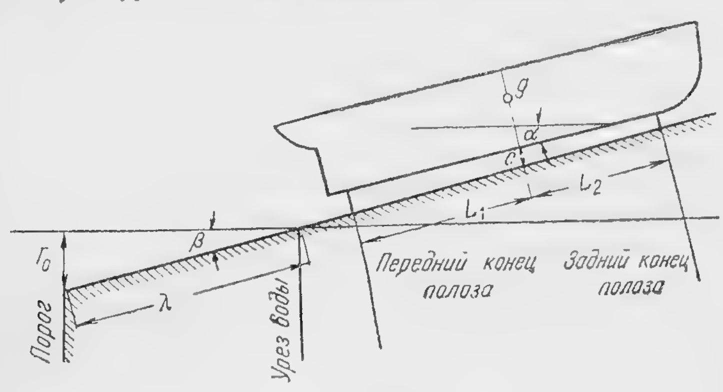


Рис. 100.

Тангенс угла β уклона спусковых дорожек на практике обычно колеблется для продольного спуска в пределах:

Для малых судов	от 1/12	до 1/15
„ средних „	„ 1/15	„ 1/19
„ больших „	„ 1/19	„ 1/24

Тангенс угла α уклона киля колеблется в тех же пределах, чаще всего $\alpha = \beta$. Если углы не равны, то разность между их тангенсами не превосходит $\pm 0{,}02$.

Благодаря малости углов α и β можно положить

$$\sin\alpha \cong \operatorname{tg}\alpha \cong \alpha; \quad \cos\alpha = 1;$$

$$\sin\beta \cong \operatorname{tg}\beta \cong \beta; \quad \cos\beta = 1.$$

Суммарная длина полозьев $L_1 + L_2$ обычно составляет около 0,8 длины судна L между перпендикулярами, таким образом

$$L_1 + L_2 \cong 0{,}8L. \tag{576}$$

Элементы неподвижной части спускового устройства, при постоянном угле уклона β, связаны между собой следующей зависимостью:

$$\frac{T_0}{\lambda} = \sin\beta \cong \beta. \tag{577}$$

Количество полозьев при продольном спуске может быть от одного до четырех.

На рис. 101 обозначены основные элементы движущейся и неподвижной частей спускового устройства при поперечном спуске, необходимые для исследования спуска с точки зрения теории корабля.

Элементы движущейся части спускового устройства:

c — возвышение киля над линией спусковых дорожек в диаметральной плоскости;

L_1 — длина передней части спускового устройства, считая от диаметральной плоскости;

L_2 — длина задней части спускового устройства, считая от диаметральной плоскости;

b — суммарная ширина всех полозьев;

$L_0 = L_1 + L_2$ — длина поверхности соприкосновения полозьев со спусковыми дорожками.

При поперечном спуске диаметральная плоскость обычно устанавливается вертикально, поэтому угол α, который является углом между основной плоскостью судна и горизонтом, будет равняться нулю.

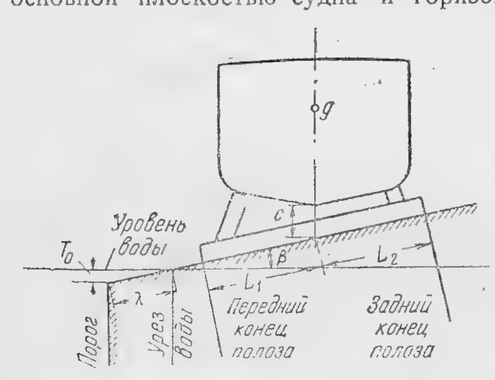


Рис. 101.

Элементы неподвижной части спускового устройства:

β — угол уклона спусковых дорожек по отношению к горизонту;

T_0 — глубина воды на пороге или высота порога над водой;

λ — длина подводной части спусковых дорожек.

Угол уклона β обычно постоянный. Тангенс угла колеблется, примерно, в пределах от 1/5 до 1/15.

Величина T_0 может быть при боковом спуске положительной, равной нулю, или отрицательной. В последнем случае T_0 будет высотой порога над водой. Если $T_0 = 0$, то урез воды расположится на пороге и $\lambda = 0$.

Количество полозьев при боковом спуске может быть от двух до двадцати, а иногда и более.

§ 59. ДЕЛЕНИЕ СПУСКА НА ПЕРИОДЫ

Продольный спуск. Продольный спуск делится на следующие периоды:

I период считается от момента начала движения до входа в воду либо судна, либо салазок. Судно совершает в первом периоде движение, параллельное поверхности спусковых дорожек, под действием силы тяжести и реакции фундамента.

II период считается от конца первого периода до момента начала всплытия. Во втором периоде судно совершает движение, параллель-

ное линии спусковых дорожек, под действием силы тяжести, давления воды и реакции фундамента.

III период считается от конца второго периода до момента отделения полозьев от спусковых дорожек. Судно в третьем периоде скользит задними концами полозьев по спусковым дорожкам и одновременно всплывает, поворачиваясь вокруг горизонтальной оси, проходящей через задние концы полозьев. Движение совершается под действием силы тяжести, давления воды и реакции фундамента.

IV период считается от конца третьего периода до полной остановки судна. В четвертом периоде судно совершает движение по инерции. Это движение состоит из поступательного движения и вертикальной и килевой качки. Движение совершается под действием силы тяжести и давления воды.

Во время второго периода может произойти опрокидывание, т. е. вращение судна около горизонтальной оси, проходящей через порог фундамента перпендикулярно диаметральной плоскости судна, передней оконечностью вниз. Спуск, протекающий без опрокидывания, называется *нормальным*.

В начале четвертого периода может произойти соскакивание, или прыжок, т. е. внезапное опускание задней оконечности судна вместе со спусковым устройством в воду.

Поперечный спуск. Поперечный спуск делится на следующие периоды:

I период считается от начала движения до начала опрокидывания. В первом периоде судно совершает движение, параллельное линии спусковых дорожек, под действием силы тяжести и реакции фундамента.

II период считается от конца первого периода до входа в воду самого судна. Во втором периоде судно сползает с порога и одновременно опрокидывается. Движение совершается под действием силы тяжести и реакции фундамента.

III период считается от конца второго периода до момента схода задних концов полозьев с порога. В третьем периоде судно сползает с порога, одновременно вращаясь вокруг горизонтальной оси, проходящей через порог, под действием силы тяжести, давления воды и реакции фундамента.

IV период считается от конца третьего периода до прекращения движения. В четвертом периоде сначала происходит соскакивание, а затем судно по инерции совершает поступательное движение и вертикальные и поперечные колебания под действием силы тяжести и давления воды.

§ 60. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА СУДНО ВО ВРЕМЯ СПУСКА

Сила тяжести, равная спусковому весу судна D_c, выражается так:

$$D_c = D + \Delta, \tag{578}$$

где D — весовое водоизмещение спускаемого судна;

Δ — вес движущейся части спускового устройства.

Обычно Δ составляет 7—15% от водоизмещения. Точка приложения спускового веса — общий ЦТ судна и движущихся частей спускового устройства.

Сила D_c и точка ее приложения определяются по нагрузке судна, исходя из степени готовности судна, и по рабочим чертежам спускового устройства.

Реакция фундамента — равнодействующая бесконечно большого числа элементарных сил, распределенных по поверхности соприкосновения полозьев со спусковыми дорожками. Реакция фундамента может быть разложена на две составляющих: силу трения F, действующую касательно поверхности соприкосновения полозьев с дорожками, и нормальную реакцию P, направленную перпендикулярно к первой. Эти две составляющие связаны следующей зависимостью:

$$F = f \cdot P, \tag{579}$$

где f — коэффициент трения; различаются коэффициент статического трения f_s и коэффициент динамического трения f_d. При этом обычно $f_d < f_s$. По данным практики, f_s колеблется от 0,03 до 0,07, а f_d — от 0,02 до 0,06. Во время опрокидывания и всплытия f_d может доходить до 0,15.

Величина коэффициента трения, в особенности динамического, зависит от следующих факторов:

1) от удельного давления p, т. е. давления, приходящегося на единицу поверхности соприкосновения полозьев со спусковыми дорожками;

2) от состава насалки спусковых дорожек;

3) от состояния и тщательности сборки спускового устройства (дорожек и полозьев);

4) от температуры воздуха.

В особенности сильно зависит коэффициент трения от удельного давления p. Эта зависимость может быть выражена следующими эмпирическими формулами:

1. Формулой проф. И. Г. Бубнова:

$$f_d = 0{,}063 - 0{,}022\,p + 0{,}003\,p^2. \tag{580}$$

2. Французской формулой:

$$f_d = \frac{0{,}05}{\sqrt{p}}. \tag{581}$$

В обеих формулах удельное давление определяется выражением

$$p = \frac{P}{b \cdot L_0},\ кг/см^2, \tag{582}$$

где $P = D_c \cos \beta$.

Допускаемое удельное давление при проектировании спускового устройства выбирается на основании данных практики и колеблется обычно в пределах от 15 до 30 $т/м^2$. Для ориентировочного выбора величины p может служить установленная на основании обобщения

большого числа практических данных зависимость максимального допустимого удельного давления p_{max} от длины судна L (рис. 102). Нормальное удельное давление может быть принято как $p = 3/4\ p_{max}$.

Иначе p может быть найдено в зависимости от спускового веса по графику В. Т. Струнникова (рис. 103).

Давление воды — равнодействующая элементарных давлений воды на поверхность погруженной части судна и подвижной части спуско-

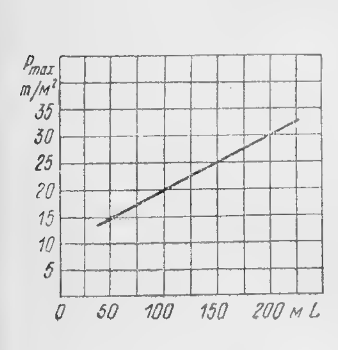


Рис. 102.

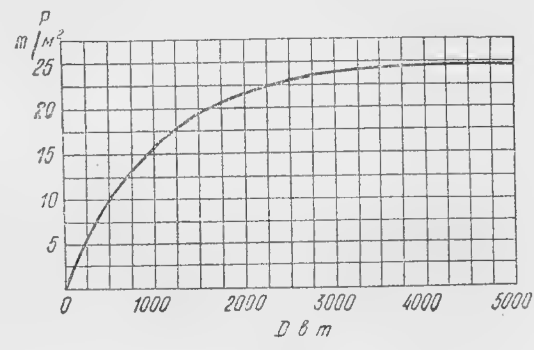


Рис. 103.

вого устройства. В расчетах спуска, ввиду сложности точного решения задачи, приближенно считают, что равнодействующая слагается из двух составляющих:

1) силы пловучести погруженных частей судна и спускового устройства и

2) сопротивления воды движению.

Ввиду того, что во втором периоде полозья плотно прижаты к насаленным спусковым дорожкам, есть основание предполагать, что вода не оказывает давления на находящуюся ниже уреза поверхность полозьев, прижатых к спусковым дорожкам. Поэтому сила пловучести будет несколько меньше произведения объема погруженных частей на удельный вес воды. Это уменьшение выразится произведением удельного веса воды на объем призмы с вертикальными стенками, ограниченной сверху поверхностью воды, а снизу — нижней поверхностью полозьев. Это уменьшение силы пловучести называется потерянной силой пловучести, или силой присасывания.

Объем призмы, определяющей величину потерянной силы пловучести при движении судна, изменяет свою величину и достигает максимума, когда передний конец полоза перейдет порог, а задний не достигнет уреза воды. Так как наиболее ответственные моменты спуска — опрокидывание и всплытие — обычно происходят, когда потерянная сила пловучести достигает максимального значения или близка к нему, то в расчетах достаточно учитывать лишь ее максимальное значение. Необходимо отметить, что в момент начала всплытия потерянная сила пловучести восстанавливается, так как вода проникает под полозья.

При расчете бокового спуска потерянной силой пловучести, ввиду ее малости, следует пренебрегать.

Полная сила пловучести сложится из трех слагаемых:

$$\gamma W = \gamma (V + v - v'); \tag{583}$$

здесь γV — сила пловучести от погруженной части судна;

γv — сила пловучести от погруженной части спускового устройства;

$\gamma v'$ — потерянная сила пловучести.

Максимальное значение потерянной силы пловучести выразится так:

$$\gamma v' = \frac{1}{2} \gamma b \lambda^2 \beta. \tag{584}$$

Полная сила пловучести приложена в общем ЦВ, т. е. в ЦТ погруженных объемов, за вычетом объема призмы, определяющей величину потерянной силы пловучести. Абсцисса точки приложения полной силы пловучести, считая от поперечной плоскости, проходящей через общий ЦТ спускаемого судна и спускового устройства, будет:

$$x = \frac{1}{W} (M + m - m'); \tag{585}$$

здесь γM — момент силы γV относительно той же плоскости;

γm — момент силы γv относительно той же плоскости;

$\gamma m'$ — момент силы $\gamma v'$ относительно той же плоскости.

Максимальный момент потерянной силы пловучести может быть вычислен по формуле:

$$\gamma m' = \gamma \left(\frac{1}{3} \lambda - a\right) v'. \tag{586}$$

В этой формуле, дополнительно к ранее принятым обозначениям, буквой a обозначено расстояние от порога до ЦТ спускового веса, считая по линии спусковых дорожек.

Величины V и M вычисляются обычным способом по масштабу Бонжана. Вычисление v и m должно быть произведено по рабочим чертежам спускового устройства.

Можно ввести поправки к масштабу Бонжана на объем спускового устройства. Для этого нужно вычислить площадь поперечных сечений спускового устройства, соответствующих шпангоутам масштаба Бонжана, и вычертить кривые масштаба Бонжана с учетом спускового устройства. На рис. 104 изображена кривая площадей одного шпангоута. Как видно из рисунка, кривая начинается не от основной плоскости, а от нижней поверхности полоза. Построенный таким образом масштаб Бонжана называется исправленным масштабом Бонжана. На исправленном масштабе Бонжана для дальнейших вычислений желательно вычертить и кривую площадей шпангоутов без спускового устройства.

Во многих случаях без особой погрешности можно одновременно пренебречь величинами v и v', а также m и m', так как они разных знаков, тогда

$$\gamma W \cong \gamma V$$

и

$$x = \frac{M}{V}.$$

Сила сопротивления воды направлена против движения судна. Поэтому, пока судно движется поступательно, имеется только сопротивление поступательному движению. При опрокидывании и всплытии появляется сопротивление вращательному движению. Равнодействующую силы сопротивления можно разложить на две составляющих — горизонтальную и вертикальную. Первая из них будет значительно больше второй, поэтому последней можно пренебречь. Для определения величины силы сопротивления воды при спуске нет сколько-нибудь надежных как теоретических, так и практических данных, так как мы имеем дело с неустановившимся движением тела, погруженный объем которого увеличивается во время движения.

Для определения сопротивления воды поступательному движению может быть применена следующая формула, рекомендованная проф. И. Г. Бубновым:

$$R = \frac{1}{1000}(6{,}5\omega + 60\omega')v^2; \qquad (587)$$

Площадь без спускового устройства
Площадь со спусковым устройством
Основная плоскость
c
Нижняя поверхность полоза

Рис. 104.

здесь v — скорость поступательного движения, *м*/сек.;
ω и ω' — площади наибольших поперечных сечений погруженных в воду объемов судна и спускового устройства, $м^2$. При этом R получается в m.

Все силы, действующие на судно при спуске, можно подразделить на две категории:

I. Силы, не зависящие от скорости и ускорения; к ним относятся:

1) сила тяжести;
2) сила пловучести;

К этой же категории сил могут быть отнесены:

3) вертикальная составляющая реакции фундамента;
4) сила трения.

II. Силы, зависящие от скорости и ускорения; к этой категории сил относится сила сопротивления воды движению.

Исходя из приведенного выше подразделения сил, исследование и расчет спуска могут быть произведены двумя способами: статическим, учитывая лишь первую категорию сил, и динамическим, учиты-

вая все силы. Ввиду того, что динамические явления во время спуска изучены еще недостаточно и пренебрежение силами второй категории не вносит существенных изменений в наиболее ответственные моменты продольного спуска, проще и надежнее производить расчет продольного спуска первым способом. Второй способ, хотя и строже, но базируется на целом ряде не вполне надежных эмпирических данных и поэтому не может претендовать на большую точность, а в некоторых случаях применение его в настоящее время и вовсе невозможно. В отношении бокового спуска необходимо отметить, что здесь силы второй категории оказывают решающее влияние на все наиболее ответственные моменты спуска. Поэтому пренебрегать ими нельзя и расчет бокового спуска можно выполнять только вторым способом.

§ 61. УСЛОВИЕ НАЧАЛА ДВИЖЕНИЯ

Для того чтобы судно, установленное на стапеле, начало самостоятельно двигаться в первом периоде, т. е. чтобы начался спуск, необходимо, чтобы составляющая Q силы тяжести, параллельная направлению возможного поступательного движения, была больше силы трения F:

$$Q > F,$$

где $Q = D_0 \sin\beta$ и $F = D_0 f_s \cos\beta$.

После подстановки получаем условие начала самостоятельного движения:

$$\operatorname{tg}\beta > f_s$$

или

$$\beta > f_s. \qquad (588)$$

Если это условие не выполнено, то для начала движения необходимо к судну с помощью толкачей приложить силу A, удовлетворяющую следующему очевидному условию:

$$A \geqslant D_0 (f_s \cos\beta - \sin\beta) \cong D_0 (f_s - \beta). \qquad (589)$$

§ 62. УСЛОВИЕ ОПРОКИДЫВАНИЯ

Если рассматривать явление статически, то условие опрокидывания может быть сформулировано так: опрокидывание произойдет, если после того, как центр тяжести перейдет за порог, момент спускового веса относительно порога M'_D в каком-либо положении корабля окажется больше момента силы пловучести относительно порога M'_W, т. е. если

$$|M'_D| > |M'_W| \qquad (590)$$

или иначе: опрокидывание произойдет, если равнодействующая N спускового веса D_0 и силы пловучести γW перейдет за порог.

Если обозначить через r расстояние от точки пересечения равнодействующей $N = D_0 - \gamma W$ с линией спусковых дорожек до порога,

считая r положительным, когда N не дошло до порога, то будем иметь условие опрокидывания

$$r < 0. \tag{591}$$

Если спуск не сопровождается опрокидыванием, то он носит название нормального спуска.

Необходимо отметить, что опрокидывание возможно только после того, как сила веса перейдет за порог.

При опрокидывании реакция фундамента сосредоточена на пороге и представляет значительную величину, которая может достигать 50% от спускового веса D_c. Эта сила может представить известную опасность для корпуса судна и для спускового устройства. Поэтому проверка возможности опрокидывания и определение упомянутой силы всегда производятся при расчете спуска.

§ 63. УСЛОВИЕ НАЧАЛА ВСПЛЫТИЯ

Если рассматривать явление статически, то условие начала всплытия может быть сформулировано так: всплытие начнется, если момент веса относительно задних концов полозьев M_D окажется меньше момента силы пловучести относительно задних концов полозьев M_W, т. е. если

$$|M_D| < |M_W| \tag{592}$$

или иначе: всплытие начнется, если равнодействующая N спускового веса D_c и силы пловучести γW поднимется по фундаменту выше задних концов полозьев.

Если обозначить через l расстояние от точки пересечения равнодействующей N с линией спусковых дорожек до поперечной плоскости, проходящей через ЦТ судна и спускового устройства, то указанное условие напишется так:

$$l > L_2. \tag{593}$$

На самом деле неравенства (592) и (593) возможны лишь в том случае, если некоторая посторонняя сила удерживает полозья прижатыми к фундаменту. Всплытие начнется, как только получится равенство моментов:

$$|M_D| = |M_W| \tag{594}$$

или равнодействующая окажется у заднего конца полоза, т. е. когда

$$l = L_2. \tag{595}$$

Равнодействующую в момент начала всплытия обозначим через

$$N_в = D_c - \gamma W. \tag{596}$$

Она называется баксовым давлением и может достигать 30% спускового веса D_c, а в отдельных случаях может быть даже больше.

Баксовое давление, достигая больших значений, может представить известную опасность для корпуса судна и для спускового устройства. Поэтому оно подлежит всегда определению при расчете спуска.

В третьем периоде происходит постепенное всплытие, поэтому все время сохраняется равенство моментов (594), и равнодействующая все время проходит через задние концы полозьев.

§ 64. УСЛОВИЕ СОСКАКИВАНИЯ

Соскакивание будет иметь место всегда, если глубина воды на пороге T_0 меньше осадки T_2 задними концами полозьев спущенного судна, т. е. если

$$T_0 < T_2.$$

Если $T_0 \geqslant T_2$, то судно плавно отделится от фундамента задними концами полозьев.

При соскакивании, если скорость поступательного движения недостаточна, судно может удариться задней оконечностью о порог или задними концами полозьев о грунт сразу за порогом. Этот удар может представить известную опасность для корпуса судна, поэтому соскакивание всегда подлежит проверке при расчете спуска.

Соскакивание — явление чисто динамическое, поэтому исследовать его можно только с этой точки зрения.

§ 65. ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОЛОЖЕНИЕ СУДНА ВО ВРЕМЯ ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА

Расположение и направление координатных осей ox, oy и oz, связанных с судном, изображено на рис. 105. Поперечная плоскость yoz расположена так, что точка G приложения спускового веса D_c лежит на ней. За неподвижную точку принимаем порог.

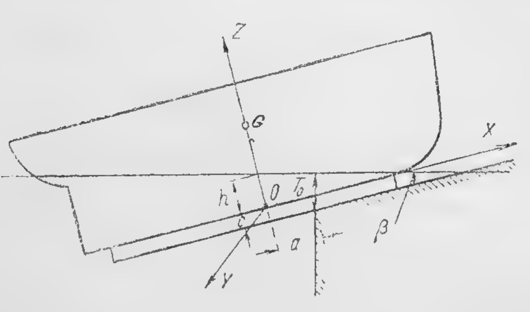


Рис. 105.

В первом и втором периодах положение судна в любой момент времени определяется одним параметром — расстоянием a от порога до начала координат, измеренным по линии спусковых дорожек, которое считается положительным, пока начало координат не перешло за порог.

Положение уровня воды относительно судна определяется расстоянием h от начала координат до точки пересечения поверхности воды с осью oz (рис. 105).

Параметры a и h связаны между собой следующим образом:

$$h = T_0 - a\beta - c. \quad (597)$$

В третьем периоде положение судна в любой момент времени определяется двумя параметрами: расстоянием $a+L_2$ от порога до задних концов полозьев и углом φ поворота судна относительно фундамента.

Положение уровня воды относительно судна определяется расстоянием h и углом между осью ox и ватерлинией, т. е. углом дифферента ψ судна, который считается положительным при диференте на нос.

Параметры a и φ связаны между собой некоторой дополнительной зависимостью, такой, что во все время третьего периода равнодействующая проходит через задние концы полозьев. Аналогичной зависимостью связаны между собой и параметры h и ψ.

Взаимная связь обеих пар параметров может быть написана в таком виде:

$$h = T_0 - a\beta - c - \varphi L_2, \tag{598}$$

$$\psi = \varphi - \alpha. \tag{599}$$

В четвертом периоде положение судна в любой момент определяется тремя параметрами: расстоянием $a+L_2$ от порога до задних концов полозьев, осадкой T_2 задними концами полозьев и углом φ.

Положение уровня воды относительно судна определяется двумя параметрами h и ψ.

Взаимная связь параметров напишется так:

$$h = T_2 - c - L_2\psi, \tag{600}$$

$$\psi = \varphi - \alpha. \tag{601}$$

Высказанные положения справедливы для четвертого периода лишь в том случае, когда мы пренебрегаем влиянием течения при спуске.

§ 66. СТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА ВО ВТОРОМ ПЕРИОДЕ; КРИТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Момент равнодействующей N относительно порога выражается так:

$$M'_N = M'_D + M'_W, \tag{602}$$

где каждый из моментов согласно рис. 106, если отбросить величины высшего порядка малости, выражается следующим образом:

$$M'_D = D_c a, \tag{603}$$

$$M'_W = -\gamma W(a+x), \tag{604}$$

$$M'_N = N(a+l). \tag{605}$$

По мере движения судна во втором периоде момент равнодействующей M'_N сначала уменьшается, а затем, достигнув некоторого минимального значения, начинает возрастать.

Положение судна, когда M'_N имеет минимальное значение, называется критическим положением по опрокидывающему моменту. Если в критическом положении $M'_N < 0$, то опрокидывание имеет место.

Для критического положения имеем:

$$\frac{d(M'_N)}{da} = 0.$$

Если взять производную выражения (602), то после подстановок и преобразований можно получить зависимость:

$$N = -\gamma S (a + \xi) \beta, \tag{606}$$

которая называется критическим уравнением по моменту, и была предложена В. В. Семеновым Тян-Шанским; здесь S—площадь ВЛ, соответствующей критическому положению; ξ — абсцисса ЦТ площади S, считая от плоскости yoz.

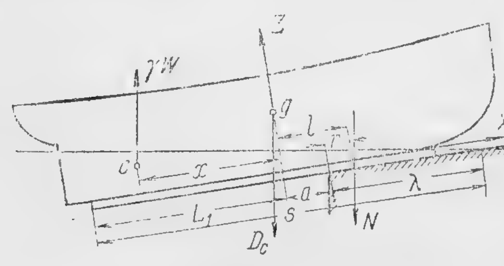


Рис. 106.

Обозначая $a_к$ расстояние от порога до плоскости yoz, соответствующее критическому положению, можно написать момент равнодействующей для критического положения, т. е. когда он наименьший:

$$(M'_N)_к = -\gamma S (a_к + \xi) a_к \beta - \gamma W x; \tag{607}$$

здесь S, ξ, W и x соответствуют критическому положению.

Если $(M'_N)_к > 0$, то опрокидывания нет. Чем больше $(M'_N)_к$, тем безопаснее спуск. Относя $(M'_N)_к$ к некоторому постоянному произведению той же размерности, характеризующему основные размеры судна, получим безразмерный коэффициент опрокидывания:

$$k = \frac{(M'_N)_к}{D_c L_1} = -\frac{1}{D_c L_1} [\gamma S (a_к + \xi) a_к \beta + \gamma W x]. \tag{608}$$

Величина коэффициента k характеризует возможность опрокидывания и запас против опрокидывания.

Расстояние равнодействующей N от порога может быть написано так:

$$r = a + l, \tag{609}$$

где

$$l = -\frac{\gamma W x}{N}. \tag{610}$$

По мере движения судна во втором периоде расстояние равнодействующей от порога сначала уменьшается, а затем, достигнув

некоторого минимального значения, начинает увеличиваться. Положение судна, когда r имеет минимальное значение, называется критическим положением по равнодействующей. Это критическое положение близко к критическому положению, соответствующему минимальному моменту M'_N, но с ним не совпадает. Если в критическом положении $r < 0$, то опрокидывание имеет место.

Для критического положения

$$\frac{dr}{dh} = 0.$$

Если взять производную от выражения (609), то после подстановки и преобразований можно получить следующую зависимость:

$$N = \gamma S (l - \xi) \beta, \tag{611}$$

которая называется критическим уравнением по равнодействующей и была предложена проф. В. Г. Власовым.

Расстояние r, соответствующее критическому положению, называется критическим расстоянием и обозначается $r_к$:

$$r_к = a_к - \frac{\gamma W x}{D_c - \gamma W}; \tag{612}$$

здесь W и x соответствуют критическому положению.

Если $r_к > 0$, то опрокидывания нет. Чем больше $r_к$, тем безопаснее спуск. Таким образом, величина $r_к$ показывает, каким запасом против опрокидывания обладает судно.

§ 67. СТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕТЬЕГО ПЕРИОДА ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА; ВСПЛЫТИЕ

Момент равнодействующей N относительно задних концов полозьев:

$$M_N = M_D + M_W, \tag{613}$$

где каждый из моментов согласно рис. 107 выражается следующим образом (пренебрегая величинами высшего порядка малости):

$$M_D = -D_c L_2, \tag{614}$$

$$M_W = \gamma W (L_2 - x), \tag{615}$$

$$M_N = -N (L_2 - l). \tag{616}$$

Всплытие начнется при $M_N = 0$, что выразится следующей зависимостью:

$$D_c L_2 - \gamma W (L_2 - x) = 0, \tag{617}$$

которая называется уравнением всплытия и была в таком виде предложена проф. В. Г. Власовым.

Баксовое давление $N_в = D_c - \gamma W$ может быть вычислено по приближенной формуле, предложенной проф. В. Г. Власовым:

$$N_в = \frac{D_c H}{L_2 - \xi}(\alpha + \psi_c); \tag{618}$$

здесь ψ_c — угол диферента спущенного судна, а H — большая метацентрическая высота и ξ берутся для водоизмещения D_c.

Ввиду того, что формула (618) приближенная, можно брать D_c, пренебрегая весом спускового устройства Δ.

В третьем периоде, как только начинается вращение вокруг задних концов полозьев, восстанавливается потерянная сила плавучести, т. е. $\gamma v' = 0$, и в дальнейшем все время

$$\gamma W = \gamma (V + v).$$

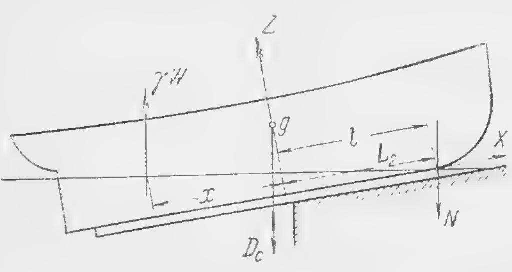


Рис. 107.

При восстановлении потерянной силы плавучести судно для соблюдения уравнения равновесия (617) должно повернуться на угол:

$$\delta\varphi_0 = \frac{v' L_2 - m'}{I_a}; \tag{619}$$

здесь $I_a = I_f + (L_2 - \xi)^2 S$, где I_f — момент инерции площади ватерлинии всплытия относительно центральной поперечной оси.

В дальнейшем судно будет перемещаться и поворачиваться так, что все время будет соблюдаться равенство нулю суммы моментов всех сил относительно задних концов полозьев. Этому условию будет отвечать следующее соотношение между перемещениями:

$$\delta\varphi = -\frac{S(L_2 - \xi)\beta}{I_a}\delta a. \tag{620}$$

Эта зависимость справедлива при условии постоянства величин S, ξ и I_a.

Рассматривая движение в третьем периоде статически и полагая для малого перемещения δa величины S, ξ и I_a постоянными, можно с помощью формулы (620) получить последовательные положения судна в третьем периоде. Для этого, перемещая судно на малую величину δa_1, которая в данном случае является перемещением заднего конца полоза, вычисляем по теоретическому чертежу S, ξ и I_f, а затем, по приведенной выше формуле, I_a и, наконец, находим по формуле (620) $\delta\varphi_1$.

Повернув судно на угол $\delta\varphi_1$ и дав ему следующее малое перемещение δa_2, повторяем все вычисления и получаем новое значение $\delta\varphi_2$ и так далее до конца третьего периода. Очевидно, чем меньше будут принимаемые значения δa, тем точнее будет каждый раз определяться новое положение судна.

§ 68. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТВЕРТОГО ПЕРИОДА ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА; СОСКАКИВАНИЕ

Высота прыжка d при соскакивании, равная разности осадки задними концами полозьев спущенного судна и высоты воды на пороге, выразится так:

$$d = T_2 - T_0. \tag{621}$$

Во время прыжка судно по инерции пройдет положение равновесия, и задние концы полозьев опустятся глубже осадки T_2. Если не учитывать сопротивления воды, то максимальное погружение задних концов полозьев может быть

$$T' = 2T_2 - T_0. \tag{622}$$

Поэтому глубина воды сразу за порогом должна быть не менее T'.

§ 69. ПЕРВЫЙ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СПУСКА

Этот способ заключается в построении диаграммы, содержащей следующие зависимости, построенные в функции от пройденного во втором периоде пути s, который выражается так:

$$s = L_1 + \lambda - a. \tag{623}$$

В начальный момент второго периода $s = 0$.

1. Зависимость между спусковым весом D_c и пройденным путем (горизонтальная прямая).

2. Зависимость между силой пловучести γW и пройденным путем (кривая).

3. Зависимость между моментом M_D спускового веса относительно задних концов полозьев и пройденным путем (горизонтальная прямая):

$$M_D = -D_c L_2. \tag{624}$$

4. Зависимость между моментом M_W силы пловучести относительно задних концов полозьев и пройденным путем (кривая):

$$M_W = \gamma W (L_2 - x). \tag{625}$$

5. Зависимость между моментом M'_D спускового веса относительно порога и пройденным путем (наклонная прямая):

$$M'_D = D_c (L_1 + \lambda - s). \tag{626}$$

6. Зависимость между моментом M'_W силы пловучести относительно порога и пройденным путем (кривая):

$$M'_W = -\gamma W (L_1 + \lambda - s + x). \tag{627}$$

Для построения зависимостей γW, M_W и M'_W необходимо иметь 6 или более точек. Для этого нужно провести на исправленном мас-

18*

штабе Бонжана под углом α к основной линии соответствующее количество ватерлиний. Для повышения точности расчетов рекомендуется проводить ватерлинии через точки пересечения шпангоутов с линией спусковых дорожек. По табл. 84 нужно произвести расчет водоизмещения $V+v$ и момента водоизмещения $M+m$ относительно плоскости zoy.

Таблица 84

Вычисление водоизмещения и абсциссы ЦВ

№ шпангоутов	Площади шпангоутов		Произведения I (II—III)
	носовых	кормовых	
I	II	III	IV
0	ω_0		0
1	ω_1	ω_1'	$\omega_1 - \omega_1'$
.			
.			
$m-1$	ω_{m-1}	ω_{m-1}'	$(m-1)(\omega_{m-1} - \omega_{m-1}')$
m	ω_m	ω_m'	$m(\omega_m - \omega_m')$
Суммы	$\sum_1$		$\sum_2$
Поправки	$\frac{1}{2}(\omega_m + \omega_m')$		$\frac{1}{2} m(\omega_m - \omega_m')$
Исправленные суммы	$\sum_1'$		$\sum_2'$

Табл. 84 составлена применительно к правилу трапеций, по которому и рекомендуется производить вычисления, так как правило Чебышева здесь может дать значительную ошибку.

Исходя из обозначений таблицы, интересующие нас выражения напишутся так [1]):

$$V+v=\frac{L}{2m}\sum\nolimits_1',$$

$$M+m=\frac{L}{2m}\left(\frac{L}{2m}\sum\nolimits_2'+X\sum\nolimits_1'\right),$$

где L — длина по конструктивной ВЛ;

X — расстояние между ЦТ судна и плоскостью миделя; $X>0$, если ЦТ лежит в корму от миделя.

---

[1]) Если судно спускается носом вперед, то сумме $\sum_2'$ необходимо приписать знак минус.

Полученные из табл. 84 значения $V+v$ и $M+m$ вписываются в табл. 85. В таблицу вписываются параметры $h+c$ проведенных на исправленном масштабе Бонжана ватерлиний, а также значения пути s, соответствующие номерам ватерлиний и связанные с параметрами $h+c$ следующей зависимостью:

$$s = L_1 + \frac{h+c}{\beta}. \tag{628}$$

Выражение v', как было указано выше, вычисляется для всех строк таблицы один раз по формуле (584), выражение m' — по формуле (586), однако, используя величины, имеющиеся в таблице, получим выражение:

$$m' = v'\left(\frac{h+c}{\beta} - \frac{2}{3}\lambda.\right). \tag{629}$$

Вычисленные в табл. 85 значения s, γW и X вписываются в табл. 86, в которой вычисляются моменты M_W и M'_W. Величина M_D вычисляется по формуле (626) для двух каких-либо ватерлиний.

На рис. 108 изображена диаграмма, построенная на основании вычислений, произведенных по табл. 84—86. Точка A на диаграмме представляет момент начала всплытия, поэтому с диаграммы могут быть сняты соответствующие точке A баксовое давление $N_в$ и путь $s_в$, пройденный к моменту начала всплытия. Точка B соответствует равенству $M'_D = 0$, т. е. моменту, когда ЦТ проходит над порогом; после этого момента только и возможно опрокидывание. Опрокиды-

Таблица 85

Вычисление водоизмещения и абсциссы ЦВ с учетом потерянной силы пловучести

№ ватерлиний	$h+c$	$s = L_1 + \frac{II}{\beta}$	$V+v$	$\gamma W = \gamma(IV+v')$	$m' = v'\left(\frac{II}{\beta} - \frac{2}{3}\lambda\right)$	$M+m$	$\gamma\mathfrak{M} = \gamma(VII - VI)$	$x = \frac{VIII}{V}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
.								
.								
$n-s$								
n								

вание может иметь место лишь на участке между точками A и B. Так как по диаграмме (рис. 108) везде $M'_W > M'_D$, то опрокидывания нет. Если кривые M'_W и M'_D пересекаются, то $M'_W < M'_D$ и опрокидывание имеет место.

Левее точки A диаграмма не отвечает действительному положению судна на стапеле, так как здесь наступает третий период, и судно вращается вокруг задних концов полозьев. Таким образом, на этом участке диаграмма физического смысла не имеет. Тем не менее, так как трудно заранее предугадать момент всплытия, этот участок при построении часто получается.

Таблица 86

Вычисление моментов силы пловучести

№ ватерлиний	s	x	γW	$L_2 - \text{III}$	$M_W = \text{IV} \cdot \text{V}$	$L_1 + \lambda - \text{II} + \text{III}$	$M'_W = \text{IV} \cdot \text{VII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1							
2							
.							
.							
$n-1$							
n							

Если этот участок имеется, то он может служить хорошей проверкой правильности вычислений и построения. Точки P и Q диаграммы должны быть обязательно на одной вертикали, причем эта вертикаль соответствует моменту, когда задний конец полоза придет на порог. Дело в том, что в точках P и Q мы имеем равенства $M_W = M'_W$ и $M_D = M'_D$, что возможно только, когда задний конец полоза придет на порог.

На рис. 108 изображена полная диаграмма; между тем для решения вопросов, связанных со всплытием и опрокидыванием, достаточно иметь участок диаграммы между точками A и B. Поэтому нужно заранее определить абсциссы этих точек и затем для расчета взять 6 ватерлиний в этих пределах.

Абсцисса точки B определяется по формуле:

$$s = L_1 + \lambda. \tag{630}$$

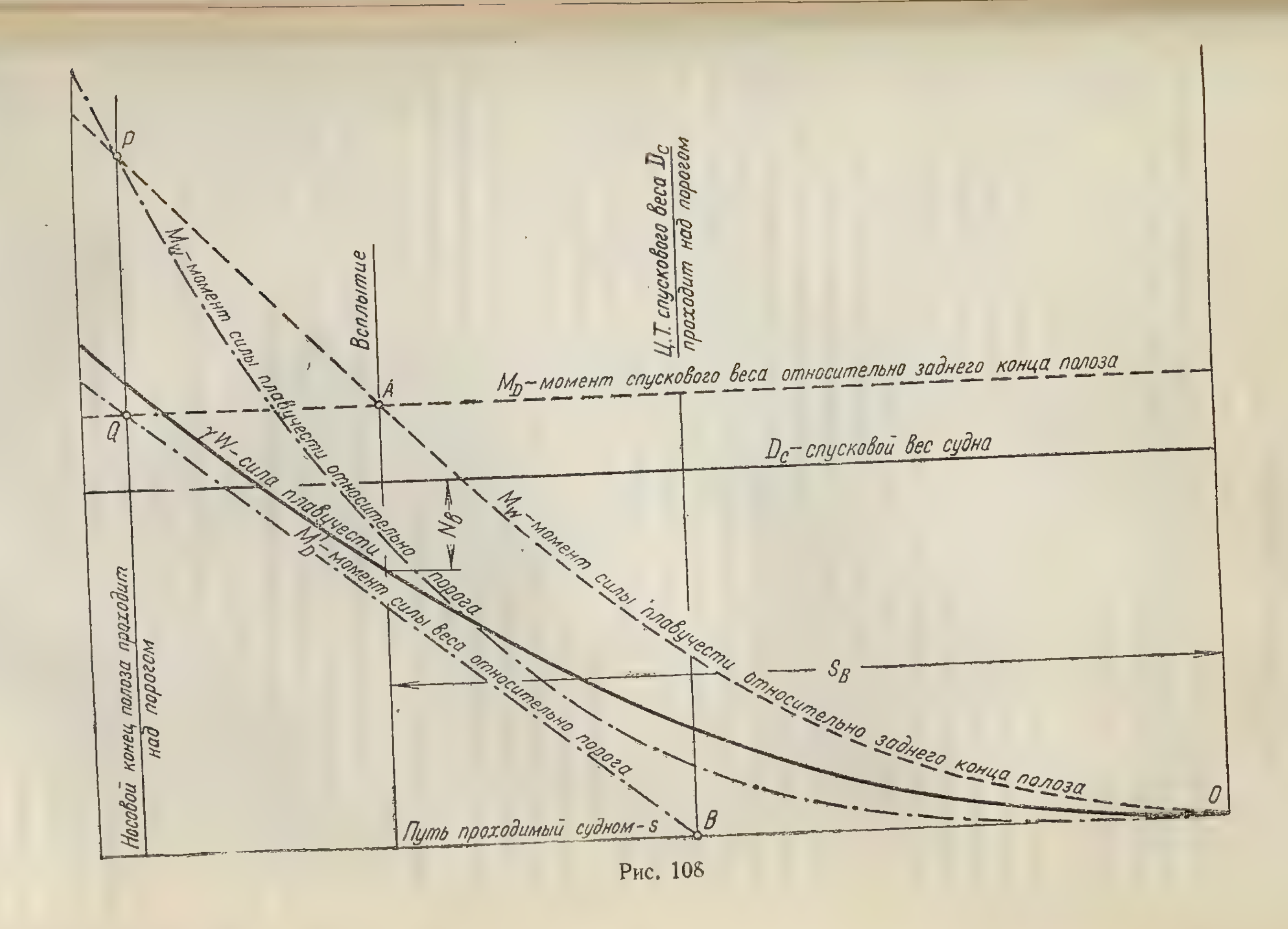

P
Q
A
B
O
Всплытие
Ц.Т. спускового веса D_C проходит над порогом
M_D – момент спускового веса относительно заднего конца полоза
D_C – спусковой вес судна
M_W – момент силы плавучести относительно заднего конца полоза
M_W – момент силы плавучести относительно порога
γW – сила плавучести
M'_D – момент силы веса относительно порога
N_B
S_B
Носовой конец полоза проходит над порогом
Путь проходимый судном – s

Рис. 108

Параметр соответствующей ватерлинии

$$h = \lambda\beta - c. \tag{631}$$

Абсцисса точки A, с запасом в бо́льшую сторону, может быть определена, исходя из приближенной формулы для баксового давления [см. уравнение (618)]. Для этого сначала определяем параметр ватерлинии по формуле

$$h = 1{,}2\,[T_{\text{ср}} + (\xi + X)\,\alpha], \tag{632}$$

где $T_{\text{ср}}$ — средняя осадка по грузовому размеру, соответствующая водоизмещению $\gamma W = D_{\text{с}} - N_{\text{в}}$, где $N_{\text{в}}$ вычислено по приближенной формуле (618), а ξ — абсцисса ЦТ ватерлинии, соответствующая водоизмещению γW; коэффициент 1,2 учитывает возможную ошибку вычислений по формуле (618) в 20%.

Абсцисса s получается по формуле (628).

Приведенная схема расчета справедлива для спуска со стапеля с постоянным углом уклона β. Если спуск производится со стапеля с изменяющимся уклоном, то необходимо на масштабе Бонжана проводить ватерлинии под разными углами, соответствующими положению судна на стапеле при данном погружении. Эти углы определяются графически, исходя из заданного очертания линии спусковых дорожек. При прогрессивно возрастающем угле уклона стапеля углы уклона для верхних ватерлиний будут больше, чем для нижних. При прогрессивно убывающем — наоборот. В табл. 86 нужно дополнительно ввести один столбец переменных углов уклона β. В столбцы III и VI нужно вводить для каждой ватерлинии свое значение угла β. Второй столбец придется ввести для объема призмы v', который согласно формуле (584) зависит от угла β.

Если расчет производится в нескольких вариантах для разных глубин воды на пороге T_0, то изменяться будет длина подводной части λ. Поэтому на диаграмме нужно построить несколько зависимостей M'_D и M'_W для принятых значений T_0. Эти зависимости представляются в виде серий кривых.

Если необходимо построить зависимость между r и путем s, то нужно взять разность абсолютных величин моментов M'_W и M'_D и поделить ее на разность $D_{\text{с}} - \gamma W$. Произведя это вычисление для нескольких положений судна, получим возможность построить кривую r на той же диаграмме.

§ 70. ВТОРОЙ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СПУСКА

Этот способ заключается в построении диаграммы, содержащей следующие зависимости, построенные в функции от погружения T_1 переднего конца полоза во втором периоде:

1) зависимость между спусковым весом $D_{\text{с}}$ и осадкой (вертикальная прямая);

2) зависимость между силой пловучести γW и осадкой (кривая);

3) зависимость между расстоянием a от порога до плоскости yoz и осадкой (наклонная прямая):

$$a = L_1 + \frac{1}{\beta}(T_0 - T_1); \tag{633}$$

4) зависимость между абсциссой l, равнодействующей N и осадкой (кривая):

$$l = -\frac{\gamma W x}{N}. \tag{634}$$

Для построения зависимостей γW и l необходимо иметь шесть или более точек. Для этого нужно провести на исправленном масштабе Бонжана под углом α к основной линии соответствующее количество ватерлиний. Чтобы повысить точность расчетов, рекомендуется проводить ватерлинии через точки пересечения шпангоутов с линией спусковых дорожек. Вычисление водоизмещения $V+v$ и момента водоизмещения $M+m$ нужно производить по табл. 84 (§ 69).

Таблица 87

Вычисление равнодействующей N и абсциссы точки ее приложения l

№ ватерлиний	T_1	$V+v$	$\gamma(\text{III}-v')$	$m = v'\left(\frac{\text{II}}{\beta} - L_1 - \frac{2}{3}\lambda\right)$	$M+m$	$\gamma\mathfrak{M} = \gamma(\text{VI}-\text{V})$	$N = D_0 - \text{IV}$	$l = -\frac{\text{VII}}{\text{VIII}}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
.								
.								
$n-1$								
n								

Вычисленные в табл. 84 $V+v$ и $M+m$ вписываются в табл. 87. Туда же вписываются значения T_1, соответствующие проведенным на исправленном масштабе Бонжана ватерлиниям. Выражение v' вычисляется один раз для всех ватерлиний по формуле (584). Выражение m', используя величины, имеющиеся в таблице, вычисляется по формуле

$$m' = v'\left(\frac{T_1}{\beta} - L_1 - \frac{2}{3}\lambda\right). \tag{635}$$

Величина a вычисляется по формуле (633) для двух каких-либо значений T_1.

На рис. 109 изображена диаграмма спуска, построенная на основании вычислений, произведенных по табл. 84 и 87. Точка A на диаграмме представляет передний конец полоза, через эту точку проходит нулевая ватерлиния ($T_1 = 0$). От точки A вправо по горизонтальной оси отложена в масштабе, принятом для длин, величина $L_1 \cos\beta \cong L_1$.

Через полученную точку проведена вертикальная ось абсцисс, проходящая через ЦТ. От этой оси и производится построение всех указанных выше зависимостей. По вертикальной оси отложены осадки T_1 в масштабе, который раз в пять-десять больше горизонтального. Из точки A проведена наклонная линия спусковых дорожек под углом β к горизонтали, с учетом разных масштабов. Точка B является задним концом полоза и отстоит от точки A по горизонтали на расстоянии $(L_1 + L_2)\cos\beta \cong L_1 + L_2$.

При построении наклонной прямой a нужно откладывать положительные значения влево, а отрицательные — вправо. Прямая a идет параллельно линии спусковых дорожек на расстоянии T_0, измеренном по вертикали. При построении кривой l, наоборот, положительные значения откладываются вправо, а отрицательные — влево.

Точка P на диаграмме дает момент начала всплытия ($l = L_2$). По ватерлинии всплытия, проходящей через точку P, определяется баксовое давление $N_в$ и соответствующее началу всплытия погружение $T_в$ переднего конца полоза. Далее определяется

$$s_в = \frac{T_в}{\beta}. \tag{636}$$

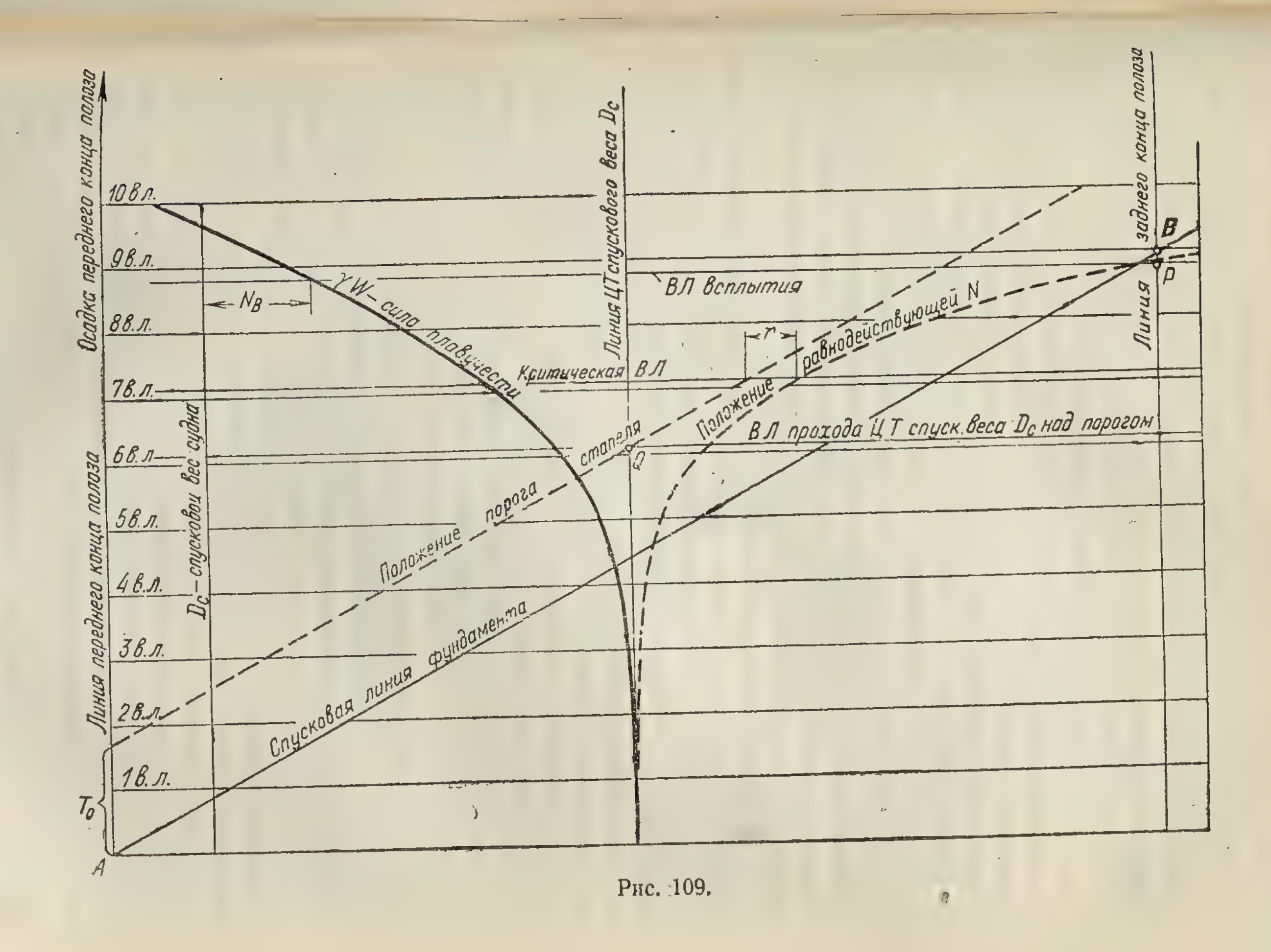
Расстояние между равнодействующей и порогом $r = l + a$ выражается отрезком ватерлинии между кривой l и прямой a. На рис. 109 при всех погружениях равнодействующая все время находится правее порога, так как кривая l и прямая a не пересекаются; поэтому опрокидывания нет. Минимальное расстояние между кривой l и прямой a, считая по ватерлиниям, есть критическое расстояние $r_к$. Точка Q на диаграмме характеризует момент, когда ЦТ находится на пороге.

На рис. 109 изображена полная диаграмма; между тем для решения вопросов, связанных со всплытием и опрокидыванием, достаточно иметь участок между ватерлинией прохождения ЦТ над порогом и ватерлинией всплытия. Поэтому нужно заранее определить осадки T_1, соответствующие указанным ватерлиниям, и затем для расчета взять шесть ватерлиний между ними.

Осадка для нижней ватерлинии может быть определена по выражению:

$$T_1 = (L_1 + \lambda)\beta. \tag{637}$$

Осадка для верхней ватерлинии может быть определена прибли-



Осадка переднего конца полоза
10 в. л.
9 в. л.
8 в. л.
7 в. л.
6 в. л.
5 в. л.
4 в. л.
3 в. л.
2 в. л.
1 в. л.
Линия переднего конца полоза
T_0
A
D_c — спусковой вес судна
N_B
γW — сила плавучести
Линия ЦТ спускового веса D_c
ВЛ всплытия
Критическая ВЛ
Положение порога стапеля
Q
r
Положение равнодействующей N
ВЛ прохода ЦТ спуск. веса D_c над порогом
Спусковая линия фундамента
Линия заднего конца полоза
B
P

Рис. 109.

женно с запасом в большую сторону, исходя из приближенной формулы (618) для баксового давления, по выражению

$$T_1 = 1{,}2\,(T_{ср} + c + L_1\beta), \tag{638}$$

где $T_{ср}$ — средняя осадка по грузовому размеру, соответствующая водоизмещению $\gamma W = D_c - N_в$, где $N_в$ вычислено по приближенной формуле (618).

Приведенная схема расчета справедлива для спуска со стапеля с постоянным углом уклона β. Если спуск производится со стапеля с изменяющимся уклоном, то необходимо на исправленном масштабе Бонжана проводить ватерлинии под разными углами. Эти углы определятся по диаграмме. На диаграмме нужно провести кривую уклона спусковых дорожек с учетом разного вертикального и горизонтального масштабов. Ватерлинии в этом случае на диаграмме будут не параллельны друг другу, а будут составлять некоторый постоянный угол β_0 с касательной к кривой в точке пересечения последней с соответствующей ватерлинией. Этот угол β_0 будет равен углу уклона спусковой линии у уреза воды. Построение всех зависимостей нужно вести по соответствующим ватерлиниям.

Иногда на диаграмме вычерчивают исправленный масштаб Бонжана. Для этого над линией спусковых дорожек, исходя из положения переднего (точка A) и заднего (точка B) концов полозьев, вычерчивают очертание диаметральной плоскости с учетом разных масштабов; затем разбиваются шпангоуты и на них вычерчивается масштаб Бонжана. Ватерлинии масштаба Бонжана и диаграммы будут в этом случае общими.

Если расчет производится в нескольких вариантах для разных глубин воды на пороге T_0, то изменяться будет длина подводной части фундамента λ. Поэтому на диаграмме нужно построить несколько зависимостей a для принятых значений T_0. Эти зависимости представятся в виде параллельно идущих линий.

§ 71. РАСЧЕТ СПУСКА СПОСОБОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В. Г. ВЛАСОВА

Этот способ заключается в том, что от некоторых, произвольно назначенных, ватерлиний или положений судна мы переходим к искомым ватерлиниям или положениям (всплытия и критическое), последовательно применяя одно и то же правило (формулу) перехода и используя каждый раз предыдущее положение, как исходное, до тех пор, пока результат не получится с требующейся точностью. За исходную ватерлинию для всплытия принимается ватерлиния, соответствующая баксовому давлению, вычисленному по приближенной формуле (618). Баксовое давление, вычисленное по приближенной формуле (618), будем обозначать $N'_в$. При подстановке в формулу величины D_c соответственно ей по кривым пловучести и начальной остойчивости должны быть определены величины H, ξ и вычислена величина ψ_c, исходя из положения ЦТ и ЦВ.

Далее по грузовому размеру находится средняя осадка $T_{ср}$, соответствующая водоизмещению:

$$\gamma W = D_c - N_в', \tag{639}$$

Затем вычисляется параметр h исходной ватерлинии по выражению:

$$h = T_{ср} - \xi\alpha, \tag{640}$$

где $\xi = \pm(\xi_0 + X)$; здесь ξ_0 — абсцисса ЦТ площади ВЛ, считая от ⊠ в нос, X — расстояние между ЦТ спускаемого судна и миделем; $X > 0$, если ЦТ лежит в корму от ⊠; перед скобкой ставится знак $+$, если судно спускается кормой вперед и знак $-$, если носом вперед.

На исправленном масштабе Бонжана и на корпусе проводится ватерлиния, исходя из $T_{ср}$ и угла α. Снимаются ординаты площадей шпангоутов ω с масштаба Бонжана и ординаты y площади ватерлинии с корпуса и вписываются в табл. 88.

В таблице производится вычисление площади ватерлинии S, абсциссы ее ЦТ, силы пловучести γW и абсциссы точки ее приложения по следующим формулам:

$$S = \frac{L}{2m}\sum\nolimits_1', \tag{641}$$

$$\xi = \pm\left(\frac{L}{2m}\frac{\sum_2'}{\sum_1'} + X\right)^{1)}. \tag{642}$$

Затем вычисляются потерянная сила пловучести v' и ее момент m' по формулам (584) и (586) и, наконец,

$$\gamma W = \gamma\left(\frac{L}{2m}\sum\nolimits_3' - v'\right), \tag{643}$$

$$x = \frac{\pm\frac{L}{2m}\left(\frac{L}{2m}\sum_4' + X\sum_3'\right) - m'\,^{1)}}{W}. \tag{644}$$

Исходя из вычисленных по табл. 88 характеристик судна для исходной ватерлинии, с помощью формулы перехода, предложенной проф. В. Г. Власовым, можно найти параметр ватерлинии всплытия $h_в$.

Этот параметр получился как сумма

$$h_в = h + \delta h_в, \tag{645}$$

где $\delta h_в$ выражается по формуле перехода следующим образом:

$$\delta h_в = \frac{D_c L_2 - \gamma W(L_2 - x)}{\gamma S(L_2 - \xi)}. \tag{646}$$

---

[1]) Знак $+$ берется, если корабль спускается кормой вперед, знак $-$, если носом вперед.

Таблица 88

Вычисление водоизмещения, абсциссы ЦВ площади ватерлинии и абсциссы ее ЦТ

№ шпангоутов	Ординаты шпангоутов		Произведения I (II—III)	Площади шпангоутов		Произведения I (V—VI)
	носовых	кормовых		носовых	кормовых	
I	II	III	IV	V	VI	VII
0	y_0		0	ω_0		0
1	y_1	y'_1	$y_1 - y'_1$	ω_1	ω'_1	$\omega_1 - \omega'_1$
.						
.						
$m-1$	y_{m-1}	y'_{m-1}	$(m-1)(y_{m-1} - y'_{m-1})$	ω_{m-1}	ω'_{m-1}	$(m-1)(\omega_{m-1} - \omega'_{m-1})$
m	y_m	y'_m	$m(y_m - y'_m)$	ω_m	ω'_m	$m(\omega_m - \omega'_m)$
Суммы	Σ_1		Σ_2	Σ_3		Σ_4
Поправки	$\frac{1}{2}(y_m + y'_m)$		$\frac{m}{2}(y_m - y'_m)$	$\frac{1}{2}(\omega_m + \omega'_m)$		$\frac{m}{2}(\omega_m - \omega'_m)$
Исправленные суммы	Σ'_1		Σ'_2	Σ'_3		Σ'_4

Если $\frac{\delta h_в}{T_c} < 5\%$, где T_c — средняя осадка спущенного судна, то можно ограничиться первым приближением. Если же это условие не выдержано, то необходимо сделать второе приближение. Для этого нужно принять ватерлинию с вычисленным параметром $h_в$ за исходную, нанести ее на исправленном масштабе Бонжана и корпусе, снять ординаты, вписать их в таблицу и проделать все вычисления вторично. Таким образом нужно действовать, пока не будет выполнено указанное выше неравенство. В большинстве случаев достаточно бывает одного приближения.

Величину $a_в$, определяющую положение судна на стапеле, нужно вычислять по формуле:

$$a_в = \frac{1}{\beta}(T_0 - h_в - c). \qquad (647)$$

Баксовое давление найдется по формуле

$$N_в = D_c - \gamma W - \gamma S \delta h_в. \qquad (648)$$

Погружение переднего конца полоза $T_в$ в момент начала всплытия, равное, примерно, максимальному погружению переднего конца полоза во время спуска, получится из выражения:

$$T_в = h_в + c + \beta L_1. \qquad (649)$$

За исходную ватерлинию для критического положения нужно взять ватерлинию всплытия, для которой все элементы судна вычислены в табл. 88.

Если вести расчет критического положения по минимальному расстоянию $r_к$ равнодействующей от порога, то в качестве формулы перехода нужно воспользоваться зависимостью, предложенной проф. В. Г. Власовым:

$$\delta h_к = \frac{N_в}{\gamma S} - \sqrt{\frac{N_в}{\gamma S}(L_2 - \xi)\beta} \qquad (650)$$

и далее

$$h_к = h_в + \delta h_к.$$

Если требуется вычислить точно параметр критической ватерлинии, то необходимо, повторяя расчет, добиваться осуществления неравенства $\frac{\delta h_к}{T_c} < 5\%$. В большинстве случаев нет необходимости знать точное значение параметра $h_к$, а достаточно знать только знак и порядок величины критического расстояния $r_к$, поэтому можно ограничиться первым приближением.

Критическое расстояние определится по формуле:

$$r_к = \lambda + l_к - \frac{1}{\beta}(h_к + c), \qquad (651)$$

где

$$l_к = \xi + \frac{1}{\beta}\sqrt{\frac{N_в}{\gamma S}(L_2 - \xi)\beta}. \qquad (652)$$

Положение судна найдем по выражению:

$$a_к = \frac{1}{\beta}(T_0 - h_к - c). \quad (653)$$

Равнодействующая $N_к$ для критического положения получится по формуле:

$$N_к = N_в - \gamma S \delta h_к. \quad (654)$$

Если вести расчет критического положения по минимальному моменту M'_N равнодействующей относительно порога, то можно воспользоваться формулой перехода, предложенной В. В. Семеновым Тян-Шанским:

$$\delta h_к = \frac{1}{2}\left[\frac{N_в}{\gamma S} + (a_в + \xi)\,\beta\right] \quad (655)$$

и далее

$$h_к = h_в + \delta h_к. \quad (656)$$

При этом, если не требуется знать точно величину момента $(M'_N)_к$, то можно ограничиться первым приближением; если точное знание момента необходимо, то следует добиваться той же точности, как и в предыдущем случае.

Момент равнодействующей определится по выражению:

$$(M'_N)_к = -\gamma S(a_к + \xi)a_к\beta + N_в L_2 - \gamma S \xi \delta h_к \quad (657)$$

и, наконец, коэффициент опрокидывания по выражению (608):

$$k = \frac{(M'_N)_к}{D_0 L_1}. \quad (658)$$

Положение судна и величину равнодействующей найдем, как и в предыдущем случае, по формулам (647) и (648).

Приведенный способ расчета применим для спуска судна по фундаменту с постоянным углом уклона β. В случае переменного угла β все формулы приобретают очень сложный вид.

§ 72. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА И СПУСКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВСПЛЫТИЕ И КРИТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Влияние уклона киля на всплытие. Угол уклона киля изменяется на величину $\delta\alpha$.

Для изменения параметра ватерлинии всплытия имеется формула, предложенная проф. В. Г. Власовым:

$$\delta h_в = \left[\xi - \frac{I_f}{S(L_2 - \xi)}\right]\delta\alpha; \quad (659)$$

здесь I_f — момент инерции площади ватерлинии всплытия относительно поперечной оси, проходящей через ЦТ ее площади;

S — площадь ватерлинии всплытия;

ξ — абсцисса ЦТ площади ватерлинии всплытия.

Все указанные величины относятся к ватерлинии всплытия до изменения угла α.

Интересующие нас величины $h_в$, $a_в$, $N_в$ и $T_в$ для нового положения всплытия после изменения угла α могут быть вычислены по формулам (645), (647), (648) и (649), принимая за исходные соответствующие величины для первоначального положения всплытия.

Влияние уклона киля на критическое положение. Угол уклона киля изменяется на $\delta\alpha$.

Для изменения параметра критической ватерлинии, соответствующей минимальному моменту, пренебрегая малыми величинами, имеем формулу В. В. Семенова Тян-Шанского:

$$\delta_к = \frac{1}{2}\xi\delta\alpha. \tag{660}$$

Для определения

$$(M'_N)_к = M'_N + \delta M'_N, \tag{661}$$

необходимо знать $\delta M'_N$, которое определится, если пренебречь малыми величинами, по выражению

$$\delta M'_N = [\gamma S\xi(a + \xi) + \gamma I_f]\,\delta\alpha. \tag{662}$$

Все входящие в уравнения (660) и (662) величины a, I_f, S и ξ относятся к критической ватерлинии до изменения угла α.

Теперь могут быть найдены интересующие нас величины $h_к$, $a_к$, $N_к$ и k по формулам (653), (654), (656) и (658), принимая за исходные соответствующие величины первоначального критического положения.

Влияние изменения спусковой нагрузки на всплытие. Добавляем к спусковому весу груз δD на плече η. Для изменения параметра ватерлинии всплытия имеется формула, предложенная проф. В. Г. Власовым:

$$\delta h_в = \frac{\delta D\,(L_2 - \eta)}{\gamma S\,(L_2 - \xi)}. \tag{663}$$

Величины S и ξ относятся к первоначальной ватерлинии всплытия до изменения нагрузки.

Остальные величины $h_в$, $a_в$, $N_в$ и $T_в$ вычисляются по уже известным формулам (645), (647), (648) и (649), принимая за исходные соответствующие величины первоначальной ватерлинии всплытия.

Влияние изменения спусковой нагрузки на критическое положение. Изменение нагрузки то же, что и в предыдущем случае.

Для изменения параметра критической ватерлинии, соответствующей минимальному моменту, имеем следующую формулу В. В. Семенова Тян-Шанского:

$$\delta h_к = \frac{\delta D}{2\gamma S}. \tag{664}$$

Изменение момента будет:

$$(\delta M'_N)_к = (a + \eta)\,\delta D. \tag{665}$$

Величины S и a относятся к первоначальному критическому положению до изменения нагрузки.

Остальные величины $h_к$, $a_к$, $N_к$ и k определяются по формулам (653), (654), (656) и (658), принимая за исходные соответствующие величины первоначального критического положения.

Влияние изменения длины заднего конца полоза на всплытие. Увеличиваем длину задней части спускового полоза на величину δL.

Для изменения параметра ватерлинии всплытия имеется формула проф. В. Г. Власова:

$$\delta h_в = \frac{N_в}{\gamma S (L_2 - \xi)}\,\delta L. \tag{666}$$

Величины $N_в$, S и ξ относятся к первоначальной ватерлинии всплытия, до изменения длины полоза.

Дальнейшие вычисления величин $h_в$, $a_в$, $N_в$ и $T_в$ производятся по формулам (645), (647), (648) и (649), принимая за исходные — данные первоначальной ватерлинии всплытия.

Здесь необходимо отметить, что изменение длины задней части полоза никак не влияет на критическое положение.

Влияние высоты спускового устройства на всплытие. Увеличение высоты спускового устройства на δc не отразится на параметре ватерлинии всплытия и на баксовом давлении $N_в$. Изменится только положение судна относительно порога в момент начала всплытия:

$$a_в = a - \frac{\delta c}{\beta} \tag{667}$$

и погружение кормового конца полоза $T_в$ в момент начала всплытия:

$$T_в = T + \delta c; \tag{668}$$

здесь a и T — соответствующие величины, относящиеся к первоначальному положению всплытия до изменения высоты спускового устройства.

Влияние высоты спускового устройства на критическое положение. Увеличим высоту спускового устройства на δc. Для изменения параметра критической ватерлинии, соответствующей минимальному моменту, имеем следующую формулу В. В. Семенова Тян-Шанского:

$$\delta h_к = -\frac{\delta c}{2}. \tag{669}$$

Изменение момента выразится так:

$$\delta M_N = -\frac{1}{\beta} N \delta c. \tag{670}$$

Остальные величины $h_к$, $a_к$, $N_к$ и k определятся, как и в предыдущих случаях, по формулам (653), (654), (656) и (658), исходя из соответствующих величин первоначального критического положения.

Влияние присоединения к судну поплавков. Этот случай должен рассматриваться как снятие с судна груза весом, равным водоизмещению поплавков $\gamma\Delta v$ в точке, соответствующей ЦВ поплавков, т. е. согласно изложенному выше и принимая $\delta D = -\gamma\Delta v$.

§ 73. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЕРВОГО ПЕРИОДА ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА

Движение судна в первом периоде определяется уравнением:

$$\frac{D_0}{g}s'' - D_0(\beta - f_d) = 0; \tag{671}$$

здесь s — путь, проходимый судном в первом периоде;

s' — скорость движения судна;

s'' — ускорение движения судна.

Остальные обозначения те же, что и прежде.

В начальный момент времени $t = 0$ полагаем $s = 0$ и $s' = 0$.

Интегрируя полученное уравнение для случая постоянного угла уклона, найдем выражение для скорости в функции от пройденного пути:

$$s' = \sqrt{2gs(\beta - f_d)}. \tag{672}$$

Для прогрессивно изменяющегося угла уклона спусковых дорожек, образованных по дуге круга радиуса R, скорость может быть вычислена по следующему приближенному выражению, выведенному проф. И. Г. Бубновым:

$$s' = \sqrt{2gs(\beta_0 - f_d)\left[1 \pm \frac{s}{R(\beta_0 - f_d)}\right]}, \tag{673}$$

где R — радиус дуги, по которой образован стапель.

В полученном выражении знак $+$ в квадратных скобках соответствует прогрессивно возрастающему углу уклона, а знак — прогрессивно убывающему, β_0 обозначает угол уклона спусковых дорожек против шпангоута, содержащего ЦТ судна, т. е. против начала координат, в начальный момент первого периода.

Для получения скорости s_1' в конце первого периода нужно в уравнения (672) или (673) подставить $s = s_1$ — пути, пройденному судном за первый период.

Время от начала движения до конца первого периода для постоянного уклона может быть вычислено по формуле:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2s_1}{g(\beta - f_d)}}. \tag{674}$$

Для переменного уклона спусковых дорожек проф. И. Г. Бубнов дает следующие зависимости:

1) для прогрессивно возрастающего уклона

$$t_1 = \sqrt{\frac{R}{g}}\,\mathrm{Ar\,ch}\left[1 + \frac{s_1}{R(\beta_0 - f_d)}\right], \tag{675}$$

2) для прогрессивно убывающего уклона

$$t_1 = \sqrt{\frac{R}{g}} \arccos\left[\frac{s_1}{R(\beta_c - f_d)}\right]. \tag{676}$$

§ 74. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВТОРОГО ПЕРИОДА ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА

Уравнение движения судна во втором периоде будет

$$\frac{D_c}{g} s'' - N(\beta - f_d) + R = 0. \tag{677}$$

В соответствии с предложенной проф. И. Г. Бубновым формулой (587) для сопротивления напишем:

$$R = K(s')^2, \tag{678}$$

где

$$K = f(s) = \frac{1}{1000}(6{,}5\omega + 60\omega'); \tag{679}$$

здесь, в свою очередь, $\omega = f_1(s)$ и $\omega' = f_2(s)$.

Подставляя зависимость (678) в основное уравнение (677), получим

$$\frac{D_c}{g} s'' - N(\beta - f_d) + K(s')^2 = 0. \tag{680}$$

Обычно принимается, что коэффициент трения f_d во время второго периода остается постоянным. В самом деле, коэффициент f_d зависит от удельного давления p, которое можно считать примерно постоянным, так как, с одной стороны, уменьшается равнодействующая N, а с другой стороны, уменьшается площадь соприкосновения полозьев со спусковыми дорожками.

Так как неизвестны зависимости $K = f(s)$ и $N = f(s)$, то интегрирование уравнения движения (680) в конечном виде невозможно. Значения K и N могут быть получены для определенных положений судна по чертежам, расчетам и диаграммам спуска. Этот ряд значений K и N может быть представлен в табличном виде в функции от пройденного пути. После этого интегрирование уравнения (680) может быть произведено в табличном виде.

Для этого проф. И. Г. Бубнов предложил представить скорость движения судна в виде следующего выражения:

$$s' = \sqrt{s_n'^2 + 2\int_{s_1}^{s} \delta q\, ds}, \tag{681}$$

где s'_n — скорость судна во втором периоде, вычисленная по одной из формул (672) или (673) для первого периода, т. е. считая, что сопротивление воды отсутствует;

$$\delta q = g\left[\beta - \beta_1 - \frac{\gamma W}{D_c}(\beta - f_d) - \frac{K(s_n')^2}{D_c}\right]. \tag{682}$$

δq — поправка к скорости на изменение уклона спусковых дорожек, силу пловучести и сопротивление воды движению.

В выражении поправки к скорости β — угол уклона спусковых дорожек против шпангоута, содержащего точку приложения равнодействующей сил тяжести и пловучести, а β_1 — тот же угол уклона против шпангоута, содержащего центр тяжести судна. Разность этих углов может быть выражена так:

$$\beta - \beta_1 = -\frac{l}{R} = \frac{\gamma W x}{NR} . \tag{683}$$

Угол β, в свою очередь, может быть выражен следующей формулой:

$$\beta = \beta_0 \pm \frac{s-l}{R} , \tag{684}$$

где знак $+$ соответствует спусковым дорожкам с увеличивающимся уклоном, а знак — спусковым дорожкам с уменьшающимся уклоном.

Когда мы имеем постоянный уклон спусковых дорожек, то

$$R = \infty \quad \text{и} \quad \beta - \beta_1 = 0.$$

Последний член выражения δq должен содержать s', но так как эта величина еще неизвестна и подлежит вычислению, то она заменена бóльшей величиной s'_n; из-за этого будет несколько преувеличено сопротивление, а следовательно, преуменьшена вычисленная скорость s'. Можно выполнить второе приближение, подставив в выражение δq полученную в первом приближении скорость s', но так как весь расчет базируется на целом ряде допущений, то можно сразу на-глаз несколько уменьшить скорость s'_n по сравнению с полученной по формуле (672) или (673), вводя некоторый множитель ν, меньший единицы, перед скоростью.

Для вычисления времени t проф. И. Г. Бубнов дает следующее выражение:

$$t = t_n - \int_{s_1}^{s} \frac{E}{(s'_n)^3} ds, \tag{685}$$

где t_n — время, вычисленное по формулам (674), (675) или (676) первого периода.

$$E = \int_{s_1}^{s} \delta q \, ds ,$$

вычислено ранее для получения скорости.

Все вычисления могут быть произведены в табл. 89. Значения пройденного пути, считая от начала движения, $s = s_1 + m\Delta s$ берутся из расчета для полной диаграммы спуска соответственно ватерлиниям погружения судна, нанесенным на исправленном масштабе Бонжана. Затем вычисляются на основании формул для первого периода (672) — (676) скорость s'_n и время t_n и вписываются в строки I и XXI. После

Таблица 89

Схема динамического расчета второго периода спуска

Вычисляемые величины		Пройденный путь от начала движения					
		s_1	$s_1+\Delta s$	$s_1+2\Delta s$	$s_1+3\Delta s$	$s_1+4\Delta s$	$s_1+5\Delta s$
s_n'	I						
ω	II						
ω'	III						
$K=0{,}001\,(6{,}5\omega+60\omega')$	IV						
γ: прогрессивно-возрастающий уклон	V	1,00	1,00	1,00	0,95	0,92	0,87
γ: постоянный уклон	V	1,00	1,00	1,00	0,97	0,95	0,92
γ: прогрессивно-убывающий уклон	V	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97
$\gamma s_n' = I \cdot V$	VI						
$\frac{g}{D_0}K\gamma^2(s_n')^2=\frac{g}{D_0}\,\mathrm{IV\,(VI)^2}$	VII						
$\mp l$	VIII						
$\mp\frac{g}{R}l=\frac{g}{R}\,\mathrm{VIII}$	IX						
$\beta-f_d=\beta_c\pm\frac{s-l}{R}-f_d$	X						
γW	XI						
$\frac{g}{D_0}(\beta-f_d)\gamma W=\frac{g}{D_0}\,\mathrm{X}\cdot\mathrm{XI}$	XII						
$\delta q=\mathrm{IX}-\mathrm{XII}-\mathrm{VII}$	XIII						
Интегральная $\sum$ XIII	XIV						
$2\int_{s_1}^{s}\delta q\,ds=\Delta s\,\mathrm{XIV}$	XV						
$s'=\sqrt{\mathrm{I}^2+\mathrm{XV}}$	XVI						
$E=\int_{s_1}^{s}\delta q\,ds=\frac{1}{2}\,\mathrm{XV}$	XVII						
$E:(s_n')^3=\mathrm{XVII}:\mathrm{I}^3$	XVIII						
Интегральная $\sum$ XVIII	XIX						
$\int_{s_1}^{s}\frac{E}{(s_n')^3}\,ds=\frac{\Delta s}{2}\,\mathrm{XIX}$	XX						
t_n	XXI						
$t=\mathrm{XXI}-\mathrm{XX}$	XXII						

этого строки VIII и XI заполняются на основании данных статического расчета спуска. Строки II и III заполняются величинами, снятыми с исправленного масштаба Бонжана, на котором, если есть кривые площадей шпангоутов без спускового устройства, нетрудно отдельно взять максимальные значения ω и ω_1 для данного погружения судна. В строках VIII, IX и X верхний знак соответствует увеличивающемуся уклону, а нижний — уменьшающемуся. В строку V вписаны цифровые значения коэффициента ν, которые рекомендуется применять для уменьшения скорости. В первых трех столбцах коэффициент $\nu = 1{,}0$, в остальных верхний ряд значений коэффициента соответствует увеличивающемуся уклону, средний — постоянному, а нижний — уменьшающемуся.

Если принять для коэффициента K в формуле сопротивления (678) линейную зависимость от пути, пройденного во втором периоде, а для реакции фундамента N принять некоторую параболическую зависимость от пути s, то, подставив эти зависимости в уравнение движения, можно его проинтегрировать в конечном виде. При этом получим следующую приближенную формулу для скорости движения во втором периоде для фундамента с постоянным уклоном, предложенную В. В. Семеновым-Тян-Шанским [1])

$$s' = \sqrt{\frac{2g(\beta - f_d)\,s\left(1 - \frac{q}{3}s^2\right) + (s_1')^2}{e^{ms^2}}}, \tag{686}$$

где

$$q = \frac{1 - \frac{N_{\text{в}}}{D_{\text{с}}}e^{ms_2^2}}{s_2^2}, \tag{687}$$

e — основание натуральных логарифмов;

s — путь, проходимый во втором периоде, считая от момента входа в воду;

s_2 — путь, пройденный за второй период, считая от входа в воду до начала всплытия;

$$m = \frac{g}{D_{\text{с}}}\,\frac{6{,}5\,\omega_2 + 60\,\omega_2'}{1000\,s_2};$$

здесь ω_2 и ω_2' — наибольшие площади ω и ω', соответствующие концу второго периода, т. е. пройденному пути s_2;

s_1' — скорость судна в конце первого периода.

Приближенно можно принять, что в конце второго периода

$$\omega_2' \cong 0{,}2\,\omega_2, \tag{688}$$

[1]) Вывод см. В. В. Семенов Тян-Шанский „Статика корабля", Ленинград, 1940, § 83.

тогда, принимая $g = 9{,}81$ *м/сек.*^{2}, получим степень при e в таком виде:

$$ms^2 = 0{,}181\,\frac{\omega_2 s^2}{D_c s_2}\,. \tag{689}$$

Величина e^{ms^2} может быть взята прямо по таблицам. Если же таблиц нет под руками, то можно разложить e^{ms^2} в ряд и, так как степень ms^2 практически оказывается величиной, близкой к нулю, то можно удержать только два члена. Тогда получим:

$$e^{ms^2} \cong 1 + ms^2 = 1 + 0{,}181\,\frac{\omega_2 s^2}{D_c s_2}\,. \tag{690}$$

§ 75. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕТЬЕГО ПЕРИОДА ПРОДОЛЬНОГО СПУСКА

Уравнения движения судна в третьем периоде, если исходить из рис. 110, где изображены все силы, действующие на судно, и пренебречь малыми членами, напишутся в таком виде:

$$\frac{D_c}{g}\,s'' - N(\beta - f_d) + R = 0, \tag{691}$$

$$I_a\varphi'' + D_c L_2 - \gamma W(L_2 - x) = 0, \tag{692}$$

$$N = D_c - \gamma W; \tag{693}$$

здесь $I_a = I + \frac{D_c}{g}\,L_2^2$ — момент инерции массы спускаемого судна относительно задних концов полозьев.

Величина γW здесь берется, как было указано выше, считая потерянную силу пловучести $\gamma v' = 0$.

Полученные уравнения движения (691) и (692) — независимые и потому могут решаться каждое самостоятельно.

В первом уравнении движения примем обычную зависимость для сопротивления (678)

$$R = K(s')^2,$$

причем для третьего периода можно считать, что $K = \text{const}$ и выражается так:

$$K = \frac{6{,}5\,\omega_2 + 60\,\omega_2'}{1000}\,. \tag{694}$$

Далее, принимая для N некоторую приближенную зависимость, можно получить решение уравнения (691) в таком виде:

$$s' = \sqrt{\frac{2g(\beta - f_d)\frac{N_в}{D_c}\left(1 - \frac{q_1}{2}s\right)s + (s_2')^2}{e^{2ms}}}, \tag{695}$$

где

$$q_1 = \frac{1}{\frac{T_2}{\beta} - s_2 + L_1 + L_2},$$

T_2 — осадка спущенного судна задним концом полоза,
s_2 — путь, пройденный судном за время второго периода,

$$m_1 = \frac{g}{D_c} \cdot \frac{6{,}5\,\omega_2 + 60\,\omega_2'}{1000},$$

ω_2 и ω_2' — наибольшие площади ω и ω', соответствующие концу второго периода,
s_2' — скорость судна в конце второго периода.

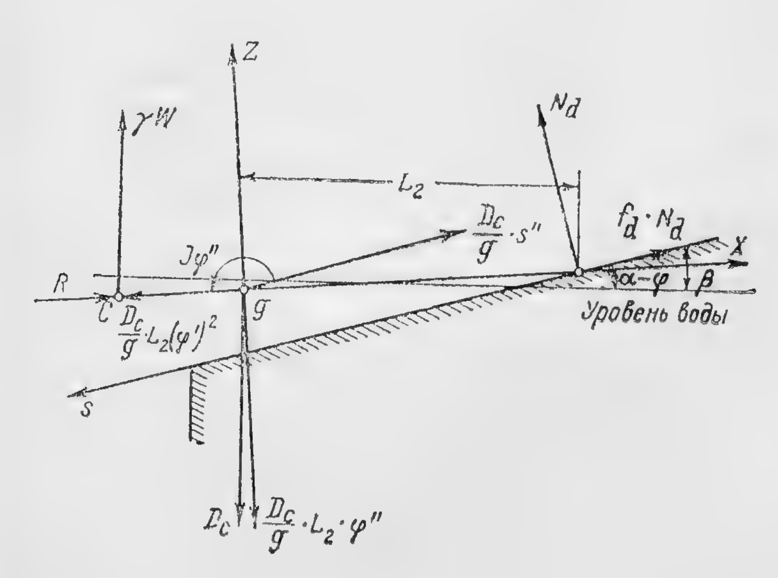


Рис. 110.

Принимая зависимость (688), получим степень при e в таком виде:

$$2m_1 s \cong 0{,}362\,\frac{\omega_2 s}{D_c}. \qquad (696)$$

Величина $e^{2m_1 s}$ берется по таблицам или с помощью разложения в ряд. Принимая во внимание, что степень $2m_1 s$ практически близка к нулю, получаем для $e^{2m_1 s}$ такую формулу:

$$e^{2m_1 s} = 1 + 2m_1 s = 1 + 0{,}362\,\frac{\omega_2 s}{D_c}. \qquad (697)$$

Это приближенное решение предложено В. В. Семеновым Тян-Шанским [1]).

Решение второго уравнения не представляет практического интереса и поэтому не приводится.

§ 76. РАСЧЕТ ЗАДЕРЖНИКОВ

Цепные задержники. Расчет остановки судна с помощью цепных задержников по способу проф. Ю. А. Шиманского состоит в следующем.

Задано: D_0 — спусковой вес судна, *т*;

s_3' — скорость судна в конце третьего периода в момент схода с фундамента, *м*/сек.;

ω — площадь погруженной части миделя в четвертом периоде, *м*²;

ω' — площадь проекции на поперечную плоскость спускового устройства и щитов, *м*²;

p — вес 1 *пог. м* якорных цепей, *т*/*м*;

T_0 — разрывное сопротивление задержников, *т*;

s_0 — расстояние от порога, на котором якоря легли на грунт, *м*;

ΔL — промежуток между задержниками, *м*.

Разбиваем путь, проходимый судном, в четвертом периоде на отдельные участки Δs и вычисляем, последовательно переходя от участка к участку, скорости движения судна по следующей формуле:

$$v_{i+1} = \sqrt{\frac{\left(1-\frac{g}{D_0}K\,\Delta s\right)v_i^2 - 2\frac{g}{D_0}R}{1+\frac{g}{D_0}K\,\Delta s}}, \qquad (698)$$

где $K = \frac{6{,}5\omega + 60\omega'}{1000}$ (по формуле проф. И. Г. Бубнова);

R — работа, затраченная судном на преодоление сопротивления задержников на рассматриваемом участке пути.

Для первого приближения принимаем $R = 0$. Начинаем расчет, полагая $v_1 = s_3'$, и вычисляем по формуле (698) v_2. Затем по v_2 вычисляем v_3 и т. д. По полученным значениям $v_1, v_2, v_3, \ldots$ строим кривую зависимости $v = f(s)$.

Сопротивление цепи может начать действовать с того момента, как будут сброшены якоря, т. е. после того, как судно пройдет путь $s = s_0$. Поэтому на диаграмме, изображающей зависимость $v = f(s)$, откладываем от начала координат по оси абсцисс в масштабе, принятом для s, расстояние s_0. От этой точки и будем в дальнейшем вести отсчет пройденного пути.

---

[1]) Вывод см. В. В. Семенов Тян-Шанский, „Статика корабля", Ленинград, 1940, § 84.

В соответствии с рис. 111 примем дополнительно следующие обозначения:

L — длина вытравленной части цепи ABD, *м*;

l — длина части цепи, провисающей по цепной линии AB, *м*;

b — длина части цепи BD, лежащей на грунте, *м*;

s — путь, пройденный судном DE, считая его от места сбрасывания якоря, *м*;

h — возвышение клюза над грунтом AE, *м*;

a — горизонтальное расстояние от клюза до точки касания цепи к грунту BE, *м*.

Из рис. 111 имеем:

$$L = l + b; \quad s = a + b; \quad L - s = l - a.$$

В качестве заданных величин при установке цепных задержников принимаются: p — вес 1 *пог. м* цепи, T_0 — разрывное сопротивление задержника и h — возвышение клюза над грунтом. Обозначим дополнительно T натяжение задержника, которое в момент разрыва достигает значения $T = T_0$.

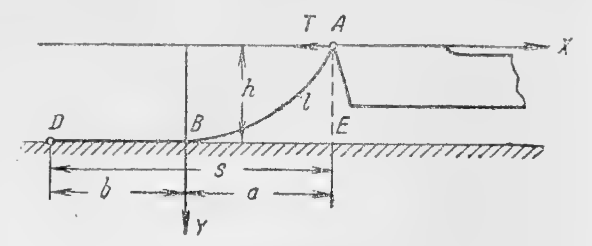


Рис. 111.

В дальнейшем приводим диаграмму проф. Ю. А. Шиманского, обобщенную путем введения безразмерных величин, для всевозможных характеристик цепных задержников p, T и h.

Величины l, a и $l - a$, определяющие положение цепи, могут быть выражены в функции некоторой безразмерной величины

$$\alpha = \frac{T}{ph}, \tag{699}$$

если рассматривать якорную цепь, как абсолютно гибкую нерастяжимую нить, следующим образом:

$$\frac{l}{h} = \sqrt{1 + 2\alpha}, \tag{700}$$

$$\frac{a}{h} = \alpha \operatorname{Ar\,sh} \frac{1}{\alpha} \sqrt{1 + 2\alpha}, \tag{701}$$

$$\frac{l - a}{h} = \alpha \left(\frac{1}{\alpha} \sqrt{1 + 2\alpha} - \operatorname{Ar\,sh} \frac{1}{\alpha} \sqrt{1 + 2\alpha} \right). \tag{702}$$

Указанные зависимости изображены графически на рис. 112.

По кривой l/h или по формуле (700), исходя из разрывного сопротивления задержника T_0 и соответствующего ему значения $\alpha_0 = \frac{T_0}{ph}$,

можно найти минимальное расстояние l_0, на котором нужно установить первый задержник, чтобы цепь не вырвала якоря. Исходя из принятого расстояния $L_1 > l_0$ между якорем и первым задержником и вычитая из него величину $l - a = L - s$, полученную по кривой $\frac{l-a}{h}$, или по формуле (702) при $T = 0$, найдем путь s, после прохождения которого начинает появляться натяжение цепи T. Далее натяжение цепи начнет постепенно нарастать до величины $T = T_0$, т. е. до момента разрыва первого стопора. Работа R, затраченная на натяжение цепи от 0 до T_0, может быть вычислена по диаграмме, представляющей зависимость $T = f(s)$ и построенной, исходя из кривой $\frac{l-a}{h}$ (рис. 113). На диаграмме $T = f(s)$, очевидно, работа выразится площадью, ограниченной сверху кривой $T = f(s)$, снизу — осью

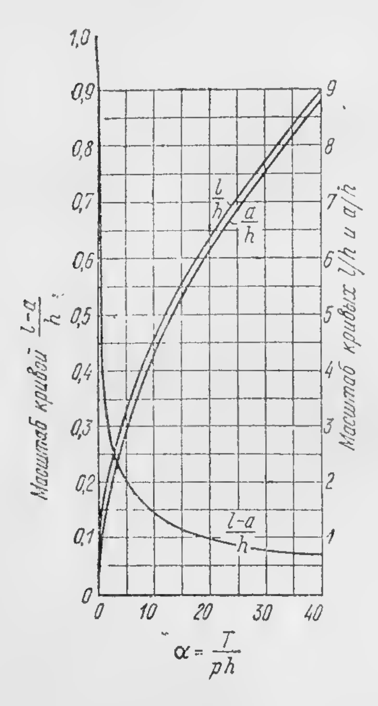


Рис. 112.

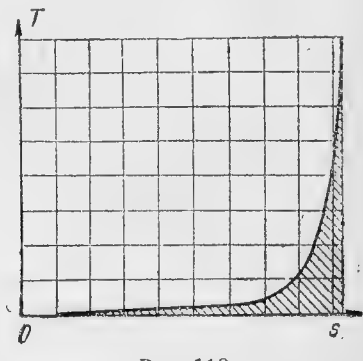


Рис. 113.

абсцисс и ординатами, соответствующими пройденному пути. Разбиваем диаграмму $T = f(s)$ на пути от значений $T = 0$ до $T = T_0$ на равные участки Δs и вычисляем площадь диаграммы для отдельных участков, т. е. работу, затраченную на натяжение цепи на этом участке. Вычисленные значения этой работы R_1, R_2, $R_3, \ldots$ подставляем последовательно в уравнение (698) и вычисляем скорость v_{i+1} движения судна в конце пройденных участков Δs, при этом каждый раз в уравнение (698) подставляем скорость v_i, полученную для предыдущего участка. Таким образом, получим скорость движения, соответствующую моменту разрыва первого стопора. На диаграмме скоростей $v = f(s)$ строим кривую изменения скорости; эта кривая пойдет, очевидно, ниже ранее вычисленной по формуле (698), в предположении $R = 0$.

При дальнейшем движении судно будет испытывать сопротивление от рвущихся задержников, так как каждый раз некоторая длина цепи ΔL будет сначала освобождаться, а затем натягиваться. Работа, затраченная на это, при двух якорных цепях вычисляется по выражению:

$$R = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{vt_1}{\Delta s}\right)[(T_0 + T)\Delta s + vt_1(T_0 - T)]; \qquad (703)$$

здесь T — натяжение задержников (по рис. 111), соответствующее длине $L - s = l - a$ при $T = T_0$, увеличенной на длину ΔL освободившегося участка цепи после разрыва задержника. Время t_1, протекшее от момента разрыва задержника до начала натяжения цепи, вычисляется по формуле:

$$t_1 = \frac{v}{g}\left(\sqrt{1 + \frac{2\Delta Lg}{v^2}} - 1\right). \qquad (704)$$

Скорость v, входящая в выражения (703) и (704), может быть принята равной скорости в конце предыдущего участка пути.

Вычисляя работу по формуле (703) для последовательных участков пути Δs, подставляем ее значения в формулу (698) и после вычислений получаем скорость движения судна в конце указанных участков пути. Эти скорости должны быть нанесены на диаграмму $v = f(s)$. Кривая скорости пойдет вниз, и в точке пересечения ее с осью абсцисс мы будем иметь значение пути, пройденного судном к моменту остановки.

Канатные задержники. Расчет остановки судна с помощью канатных задержников по способу проф. В. Г. Власова состоит в следующем.

Задано:

D_c — спусковой вес судна, *т*;

s'_3 — скорость судна в конце третьего периода в момент схода с фундамента, *м*/сек.;

s — путь, проходимый судном до начала действия задержников, *м*;

s_4 — путь, проходимый судном от начала действия задержников до полной остановки, *м*;

L_1 — длина задерживающего каната от точки его крепления к судну до точки крепления к нему первого стопора, *м*;

L_n — то же, но до точки крепления к канату последнего стопора, *м*;

n — число стопоров;

Δl — среднее уменьшение расстояния между точками крепления задержника к судну и береговой связи в момент разрыва стопора, *м*;

λ — средняя длина стопора, *м*;

K — коэффициент сопротивления воды, который можно взять по формуле Бубнова (679);

E — модуль упругости задерживающего каната (можно принять $E = 6{,}5 \cdot 10^4$ *т*/*м*²);

p_r — напряжение в стопоре, при котором происходит его разрыв; можно взять $p_r = 7{,}5 \cdot 10^3$ *т*/*м*²;

e_r — относительное удлинение стопора при разрыве, которое можно принять $e_r = 0{,}17$;

p — допустимое напряжение в задерживающем канате ($m/м^2$), которое выбирается в пределах от 1/6 до 1/9 от p_r.

Предварительно определяется: средний путь, проходимый за промежуток времени между моментами разрыва двух последовательных стопоров:

$$\Delta s = \frac{s_4}{n}, \tag{705}$$

средняя длина задерживающего каната между точками крепления к нему двух смежных стопоров:

$$\Delta L = \frac{L_n - L_1}{n - 1}, \tag{706}$$

средняя рабочая длина задерживающего каната:

$$L = \frac{L_1 + L_n}{2}. \tag{707}$$

Суммарная площадь задерживающих канатов определяется по следующему приближенному выражению:

$$S = \frac{K (s_0')^2 \Delta s}{\mu \left(e^{\frac{2Kgs_4}{D_1}} - 1 \right)}, \tag{708}$$

где $(s_0')^2 = (s_3')^2 e^{-\frac{2Kgs_0}{D_1}}$ — квадрат скорости движения судна в момент начала действия первого задержника,

D_1 = от 1,1 до 1,2 от D_c — водоизмещение с учетом присоединенной массы воды.

Если справедливо соотношение

$$p \frac{L - \Delta L}{E} + e_r \lambda > \Delta L + \Delta l, \tag{709}$$

то среднее значение отнимаемой от судна энергии, отнесенной к единице площади поперечного сечения задерживающего каната,

$$\mu = \frac{p^2}{2E} \left\{ L \left[1 - \left(\frac{p_{i-1}}{p} \right)^2 \right] + \frac{2e_r \lambda E}{3p} \left[1 - \left(\frac{p_{i-1}}{p} \right)^{3/2} \right] \right\}, \tag{710}$$

где

$$p_{i-1} = \frac{p \frac{(L - \Delta L)}{E} + e_r \lambda - (\Delta L + \Delta l)}{\frac{L}{E} + \frac{e_r \lambda}{\sqrt{p p_{i-1}}}}. \tag{711}$$

Если же

$$p \frac{L - \Delta L}{E} + e_r \lambda \leq \Delta L + \Delta l, \tag{712}$$

$$p_{i-1} = 0$$

и

$$\mu = \frac{p^2}{2E}\left(L + \frac{2e_r\lambda E}{3p}\right). \qquad (713)$$

Площадь поперечного сечения одновременно работающих стопоров найдется по выражению

$$\omega = S\frac{p}{p_r}. \qquad (714)$$

Длина окружности троса, идущего на задерживающий канат и на стопор, соответственно определится по выражениям

$$C = 2\sqrt{\pi\frac{S}{m}} \quad \text{и} \quad c = 2\sqrt{\pi\frac{\omega}{m}},$$

где m — число одновременно работающих задерживающих канатов и стопоров.

Торможение цепными драгами. Применяющиеся для торможения судна драги представляют собой связки цепей, волочащихся судном по берегу (рис. 114). Живая сила спущенного корабля расходуется

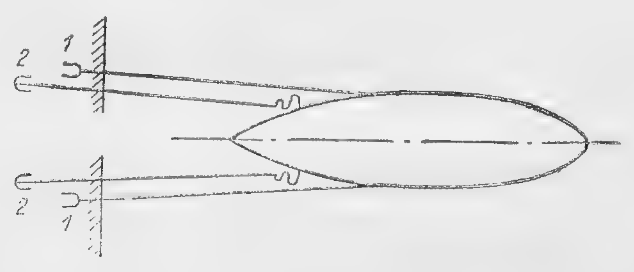


Рис. 114.

на преодоление трения буксируемых драг. Длины тросов, связывающих драги с судном, выбираются такие, чтобы действие драг началось после соскакивания судна со стапеля, во избежание преждевременной его остановки.

Расчет необходимого веса драг, разработанный проф. Власовым, состоит в следующем.

Задано:

D_1 — спусковой вес судна, увеличенный на влияние присоединенной массы воды;

ξ — путь, проходимый кораблем в 4-м периоде до начала действия первой пары драг;

v_f — скорость судна в момент соскакивания;

K — коэффициент сопротивления воды движению судна по формуле И. Г. Бубнова (679);

x_m — путь, проходимый судном с драгами до полной его остановки;

f — коэффициент трения драг по грунту; при волочении драг по бетону $f = 0{,}55$, при волочении драг по насыпному грунту $f = 0{,}7$.

В результате расчета определяется общий вес Q драг, причем предполагается, что драги вступают в действие последовательно парами, по одной с каждого борта,

$$Q = \sum q_i = \sum a_i q,$$

где $q_1 = a_1 q$ — вес первой пары драг;
$q_2 = a_2 q$ — вес второй пары драг;
$q_3 = a_3 q$ — вес третьей пары драг и т. д.

Количеством пар включающихся последовательно драг и величинами коэффициентов a_i следует задаться.

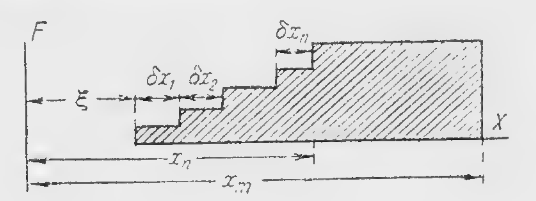


Рис. 115.

Сила торможения, создаваемая включением первой пары драг (по одной с каждого борта),

$$F_1 = a_1 f q.$$

После включения второй пары

$$F_2 = (a_1 + a_2) f q.$$

После включения n-й пары

$$F_n = \sum_1^n a_i f q.$$

На рис. 115 показан график тормозящей силы F драг в функции от пройденного пути x, имеющий вид ступенчатой кривой. Площадь этой кривой равна, очевидно, работе, поглощаемой трением драг.

Скорость движения судна к моменту начала действия первой пары драг определится формулой:

$$v_1 = v_f e^{-\frac{2Kg\xi}{D_1}}. \tag{715}$$

Вес драг определится из выражения:

$$q = \frac{D_1 v_1^2}{2gf\left(\int\limits_{\xi}^{x_m} \varphi_i e^{\frac{2Kgx}{D_1}} dx + \varphi_n \int\limits_{x_n}^{x_m} e^{\frac{2Kgx}{D_1}} dx\right)}, \tag{716}$$

где $\varphi_i = a_1 + a_2 + \ldots + a_i$;
$\varphi_n = a_1 + a_2 + \ldots + a_n$.

Заменяя приближенно ступенчатую кривую φ на участке $\xi < x < x_n$ наклонной прямой, получаем приближенную формулу:

$$q \cong \frac{Kv_1^2}{f\varphi_n \left[e^{\frac{2Kgx_m}{D_1}} - \frac{D_1}{2Kgx_n} \left(e^{\frac{2Kgx_n}{D_1}} - 1 \right) \right]}. \tag{717}$$

В целях смягчения рывка, получающегося в тросе при включении драг, последние укладываются вдоль судна в виде подковы, расположенной открытой частью в сторону движения. При такой укладке волочению драг предшествует их переворачивание, что и влечет за собой смягчение рывка. Для ориентировочной оценки возникающего в тросах усилия может служить формула (718), выведенная без учета смягчающего действия переворачивания драги:

$$F_{\max} \cong qf + v\sqrt{\frac{pE\omega}{gl}}; \tag{718}$$

здесь l — длина троса;
E — модуль Юнга для троса;
ω — площадь его поперечного сечения;
v — скорость движения судна в момент рывка;
f — коэффициент трения при волочении драги по грунту;
q — вес драги.

§ 77. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЕРВОГО ПЕРИОДА БОКОВОГО СПУСКА

Скорость движения судна в первом периоде может быть вычислена по формуле (672) для продольного спуска.

При боковом спуске может иметь место занос одной из оконечностей. Занос получается, когда скорость движения одной из оконечностей больше, чем другой; тогда движение судна сопровождается поворотом вокруг оси, перпендикулярной к плоскости спусковых дорожек, на угол δ.

Уравнения поступательного и вращательного движения будут:

$$\frac{D_c}{g} s'' = D_c (\sin\beta - f_d \cos\beta), \tag{719}$$

$$I\delta'' = D_c f_d \cos\beta x_0. \tag{720}$$

Здесь I — момент инерции массы судна относительно оси, перпендикулярной к плоскости спусковых дорожек, проходящей через ЦТ судна. С достаточной точностью можно принять $I = J$ — моменту инерции массы судна относительно поперечной оси, проходящей через ЦТ; x_0 — плечо вращающего момента — расстояние между ЦТ судна и равнодействующей сил трения F. Расстояние x_0 имеет конечное значение вследствие неравномерного распределения веса судна между полозьями, имеющими одинаковые размеры; таким образом, коэффициенты трения f_d

на разных полозьях получаются различные, так как удельное давление неодинаковое.

Решая оба уравнения, получаем зависимость между углом δ_1 и пройденным путем s_1 к концу первого периода в таком виде:

$$x_0 = \frac{\delta_1}{s_1} \rho^2 \left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{f_d} - 1 \right), \tag{721}$$

где

$$\rho^2 = \frac{Ig}{D_c}$$

квадрат радиуса инерции.

Задаваясь некоторым допустимым углом заноса δ_1 в конце первого периода, по формуле (721) получаем допустимое расстояние x_0. Допустимый угол δ_1 может быть принят порядка $\delta_1 \cong 0,003$ рад.; он зависит от зазора между рыбинами и полозом, который на практике бывает порядка 25 *мм*. При расчете заноса нежелательно допускать касания полозом рыбины, так как это может увеличить трение у отстающих полозьев и еще больше увеличить занос.

Реакции отдельных полозьев R_i могут быть найдены, исходя из кривой нагрузки судна, тем же способом, как находятся реакции кильблоков при постановке судна в док [1]). Если реакции R_i найдены, то удельные давления на полозьях получатся из выражений

$$\left.\begin{array}{l} p_1 = \dfrac{R_1 n}{L_0 b} \cos \beta \\ p_2 = \dfrac{R_2 n}{L_0 b} \cos \beta \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ p_n = \dfrac{R_n n}{L_0 b} \cos \beta \end{array}\right\} \tag{722}$$

здесь L_0 — длина полозьев; b — суммарная ширина полозьев; n — число полозьев; коэффициенты трения f_d могут быть вычислены по одной из формул (580) или (581).

Обозначая через x_i расстояния от ЦТ до осей полозьев, получим расстояние x_0 равнодействующей F сил трения от ЦТ по формуле

$$x_0 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{i=n} f_{d_i} R_i x_i}{\sum\limits_{i=1}^{i=n} f_{d_i} R_i}. \tag{723}$$

[1]) См. „Справочник по судостроению“, т. III, § 37 и 38, Госстройиздат, 1934.

Полученное по формуле (723) значение x_0 должно быть меньше полученного по формуле (721). При этом в формуле (721) должен быть взят средний коэффициент трения по выражению:

$$f_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} f_{d_i} R_i}{\sum_{i=1}^{i=n} R_i}. \qquad (724)$$

Если x_0, подсчитанная по формуле (723), будет больше допустимой величины x_0 по формуле (721), то необходимо так изменить нагрузку судна приемом балласта в одну из оконечностей, чтобы соотношение между подсчитанными величинами было обратное.

§ 78. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВТОРОГО ПЕРИОДА БОКОВОГО СПУСКА

Диференциальные уравнения движения судна во втором периоде в обобщенных координатах в форме, предложенной С. Н. Благовещенским, представятся так:

$$r'' + (H - f_d r)\,\theta'' =$$
$$= g\,[\sin\theta + (\beta - f_d)\cos\theta] + [r - H(\beta - f_d)]\,\theta'^2 + 2 f_d r'\theta'; \qquad (725)$$

$$(\rho^2 + H^2 + r^2 - 2H\beta r)\,\theta'' + Hr'' =$$
$$= g\,[r\cos\theta + (H - \beta r)\sin\theta] - 2\,(r - H\beta)\,r'\theta'. \qquad (726)$$

Здесь за обобщенные координаты принято (рис. 116):

r — расстояние от точки B, представляющей проекцию линии пересечения диаметральной плоскости с нижней поверхностью полозьев до порога,

θ — угол опрокидывания судна.

Кроме того, в уравнения введены следующие постоянные характеристики второго периода бокового спуска:

H — возвышение центра тяжести G над нижней поверхностью спусковых полозьев, измеренное по диаметральной плоскости (рис. 116);

β — угол уклона спусковых дорожек;

f_d — коэффициент динамического трения, который для второго периода может быть принят постоянным и равным 0,15—0,20, если спусковые дорожки кончаются на пороге, и равным коэффициенту динамического трения первого периода, если спусковые дорожки имеют консоли и вращаются около порога;

$\rho^2 = \frac{I_0 g}{D_0}$ — квадрат радиуса инерции судна, который вычисляется исходя из момента инерции I_0 относительно продольной оси.

Формулы (725) и (726) выведены в предположении, что угол β можно рассматривать, как малый, т. е. полагать:

$$\beta \cong \sin\beta \cong \operatorname{tg}\beta \quad \text{и} \quad \cos\beta = 1,$$

и произведениями величин βf_d можно пренебречь, как малыми по сравнению с единицей.

Уравнения движения (725) и (726) представляют систему двух нелинейных диференциальных уравнений второго порядка, которая не может быть решена в конечном виде. Поэтому решение их может быть получено только одним из методов численного интегрирования диференциальных уравнений. Здесь можно рекомендовать метод Эйлера

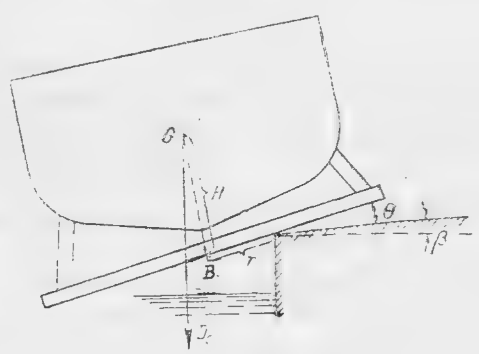


Рис. 116.

или метод Адамса-Штермера. Последний, по свидетельству А. Н. Крылова, при той же точности вычислений требует меньшей затраты труда и времени.

Начальные условия для второго периода будут:

$$\left.\begin{array}{lll} r_0 = H(\beta - f_d) & r'_0 = s'_1 & r''_0 = g(\beta - f_d) \\ \theta_0 = 0 & \theta'_0 = 0 & \theta''_0 = 0 \end{array}\right\} \qquad (727)$$

Здесь s'_1 — скорость в конце первого периода, вычисляемая по формуле (672).

Рассмотрим подробно применение метода Адамса-Штермера. Для того чтобы заполнить первые строки таблицы, можно воспользоваться разложением искомых функций r и θ в ряд Тейлора:

$$\left.\begin{array}{l} r = r_0 + r'_0 t + r''_0 \frac{t^2}{2} + r'''_0 \frac{t^3}{6} + r_0^{IV} \frac{t^4}{24} + r_0^{V} \frac{t^5}{120} + r_0^{VI} \frac{t^6}{720} + \ldots \\ \theta = \theta_0 + \theta'_0 t + \theta''_0 \frac{t^2}{2} + \theta'''_0 \frac{t^3}{6} + \theta_0^{IV} \frac{t^4}{24} + \theta_0^{V} \frac{t^5}{120} + \theta_0^{VI} \frac{t^6}{720} + \ldots \end{array}\right\} \qquad (728)$$

Полученные ряды хорошо сходятся только при малых значениях t — порядка 0,05—0,10 сек. В этих случаях практически нет необходимости идти дальше седьмого члена разложения. Значения r_0, r'_0,

r_0'', $\theta_0^{\cdot}$, θ_0', θ_0'' вычисляются по формулам (727). Высшие производные могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}
r_0''' &= -\frac{gHs_1'}{\rho^2}\\
r_0^{IV} &= -\frac{g^2H}{\rho^2}(\beta - f_d) + 2\,\frac{gs_1'^2}{\rho^2}\left(2 - \frac{H^2}{\rho^2}\right)f_d\\
r_0^{V} &= \frac{gs_1'}{\rho^2}\left[12\,\frac{s_1'^2H}{\rho^2} + g\left(1 + \frac{H^2}{\rho^2}\right)\right]\\
r_0^{VI} &= \frac{g^3}{\rho^2}\left(1 + \frac{H^2}{\rho^2}\right)(\beta - f_d) + 2\,\frac{g^2Hs_1'^2}{\rho^4}\left[42(\beta - f_d) -\right.\\
&\quad \left. - 5\left(2 - \frac{H^2}{\rho^2}\right)f_d\right] - 8\,\frac{gs_1'^4}{\rho^4}\left[9 - 11\,\frac{H^2}{\rho^2}\right]f_d\\
\theta_0''' &= \frac{gs_1'}{\rho^2}\\
\theta_0^{IV} &= \frac{g^2}{\rho^2}(\beta - f_d) + 2\,\frac{gHs_1^2}{\rho^4}f_d\\
\theta_0^{V} &= -\frac{gs_1'}{\rho^4}\left[12s_1'^2 + gH\right]\\
\theta_0^{VI} &= -\frac{g^3H}{\rho^4}(\beta - f_d) - 2\,\frac{g^2s_1'^2}{\rho^4}\left[42(\beta - f_d) + 5\,\frac{H^2}{\rho^2}f_d\right] -\\
&\quad - 88\,\frac{gHs_1'^4}{\rho^6}f_d
\end{aligned}\right\} \quad (729)$$

Формулы (729) получены из основных уравнений (725) и (726) путем диференцирования, подстановки начальных условий (727) и отбрасывания малых членов, содержащих квадраты, кубы и произведения малых величин β и f_d.

Ввиду того, что коэфициент динамического трения f_d практически для второго периода точно никогда не бывает известен, достаточно, при вычислении скоростей r' и θ', ограничиться вторыми разностями, что равносильно представлению r'' и θ'' в виде полиномов второй степени. Тогда r' и θ' представляются полиномами третьей степени, а r и θ — полиномами четвертой степени. В этом случае предварительно необходимо заполнить три первые строки расчетных таблиц, что нужно сделать с помощью формул (728), принимая промежуток интегрирования $\Delta t = 0{,}05$ сек., т. е. вычисляя r и θ для значений времени

$$t_0 = 0,\ t_1 = 0{,}05 \text{ сек. и } t_2 = 0{,}10 \text{ сек.}$$

Рабочие формулы будут следующие:

$$\left.\begin{aligned}\Delta r'_n &= F_n + \frac{1}{2}\Delta F_{n-1} + \frac{5}{12}\Delta^2 F_{n-2}\\ \Delta\theta'_n &= \Phi_n + \frac{1}{2}\Delta\Phi_{n-1} + \frac{5}{12}\Delta^2\Phi_{n-2}\end{aligned}\right\} \quad (730)$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta r_n &= \Delta t\left(r'_n + \frac{1}{2}F_n + \frac{1}{6}\Delta F_{n-1} + \frac{1}{8}\Delta^2 F_{n-2}\right)\\ \Delta\theta_n &= \Delta t\left(\theta'_n + \frac{1}{2}\Phi_n + \frac{1}{6}\Delta\Phi_{n-1} + \frac{1}{8}\Delta^2\Phi_{n-2}\right)\end{aligned}\right\} \quad (731)$$

Здесь $F_n = \Delta t r''_n$ и $\Phi_n = \Delta t\theta''_n$.

Делая подстановку F_n и Φ_n, а также первых и вторых разностей в формулы (730) и (731), придем к следующим зависимостям:

$$\left.\begin{aligned}\Delta r'_n &= \frac{\Delta t}{12}(5r''_{n-2} - 16r''_{n-1} + 23r''_n)\\ \Delta\theta'_n &= \frac{\Delta t}{12}(5\theta''_{n-2} - 16\theta''_{n-1} + 23\theta''_n)\end{aligned}\right\} \quad (732)$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta r_n &= \Delta t r'_n + \frac{\Delta t^2}{24}(3r''_{n-2} - 10r''_{n-1} + 19r''_n)\\ \Delta\theta_n &= \Delta t\theta'_n + \frac{\Delta t^2}{24}(3\theta''_{n-2} - 10\theta''_{n-1} + 19\theta''_n)\end{aligned}\right\} \quad (733)$$

Формулы (730) и (732), а также (731) и (733) равносильны и дают одинаковые значения для вычисляемых величин, поэтому численное интегрирование можно выполнять с одинаковым успехом с помощью как первых, так и вторых. Однако при использовании формул (732) и (733) можно несколько сократить объем расчетных таблиц. Кроме того, формулы (732) и (733) имеют определенный физический смысл, так как представляют движение на отрезке времени Δt, как равноускоренное с некоторым средним ускорением, которое в формулах (732) и (733) представляется выражением в скобках, деленном на 12. При этом средние ускорения для скоростей (732) и для путей (733) получаются разные и вычисляются по трем соседним значениям ускорений.

Расчет, выполняемый по описанной выше схеме, основан на пренебрежении разностями четвертого порядка для скоростей r' и θ', что равносильно пренебрежению разностями пятого порядка для путей r и θ. Как показывают расчеты, принятая степень точности численного интегрирования практически совершенно достаточна. Для иллюстрации описанного метода приводится пример с использованием формул (732) и (733), численного интегрирования системы диференциальных уравнений (725) и (726) второго периода в табличной форме.

Для того чтобы составить таблицы в более удобной форме, представим диференциальные уравнения движения (725) и (726) в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} r'' + a_1\theta'' &= a_0 \\ Hr'' + b_1\theta'' &= b_0 \end{aligned}\right\} \qquad (734)$$

где $a_1 = H - rf_d$

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= g\,[\sin\theta + (\beta - f_d)\cos\theta] + \theta'^2[r - H(\beta - f_d)] + 2f_d\, r'\theta' \\ b_1 &= \rho^2 + H^2 + r^2 - 2H\beta r \\ b_0 &= g\,[r(\cos\theta - \beta\sin\theta) + H\sin\theta] - 2r'\theta'(r - H\beta) \end{aligned}\right\} \qquad (735)$$

Тогда получим

$$\left.\begin{aligned} r'' &= \frac{a_0 b_1 - a_1 b_0}{b_1 - Ha_1} \\ \theta'' &= \frac{b_0 - Ha_0}{b_1 - Ha_1} \end{aligned}\right\} \qquad (736)$$

§ 79. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА БОКОВОГО СПУСКА ВО ВТОРОМ ПЕРИОДЕ

Расчет выполнен для корабля, имеющего спусковой вес $D_c = 573$ *т*, при уклоне спусковых дорожек $\beta = 0{,}2$, коэффициенте динамического трения $f_d = 0{,}2$, возвышении центра тяжести $H = 4{,}15$ *м*, линейной скорости в начале второго периода $s_1' = 6$ *м*/сек. и радиусе инерции $\rho = 3{,}605$ *м*.

Этих данных достаточно, чтобы по формулам (727) найти начальные условия

$$r_0 = 0 \qquad r_0' = 6 \text{ м/сек.} \qquad r_0'' = 0$$

$$\theta_0 = 0 \qquad \theta_0' = 0 \qquad \theta_0'' = 0$$

и по формулам (729) найти высшие производные

$$r_0''' = -18{,}78 \text{ м/сек.}^3; \qquad \theta_0''' = 4{,}52 \text{ м/сек.}^3;$$

$$r_0^{IV} = 7{,}32 \text{ м/сек.}^4; \qquad \theta_0^{IV} = 3{,}47 \text{ м/сек.}^4;$$

$$r_0^{V} = 619 \text{ м/сек.}^5; \qquad \theta_0^{V} = -164{,}8 \text{ м/сек.}^5;$$

$$r_0^{VI} = 547 \text{ м/сек.}^6; \qquad \theta_0^{VI} = -477 \text{ м/сек.}^6.$$

Далее, по формулам (728) вычисляются r и θ для двух значений времени $t_1 = \Delta t = 0{,}05$ сек. и $t_2 = 2\Delta t = 0{,}10$ сек.

$$r_1 = 0{,}300 \text{ м} \qquad r_2 = 0{,}597 \text{ м}$$

$$\theta_1 = 948 \cdot 10^{-7} \qquad \theta_2 = 753 \cdot 10^{-6}$$

Из расчета видно, что производные, по мере повышения порядка, быстро возрастают. В особенности быстро растут производные θ; так, θ_0^{VI} по абсолютной величине примерно в сто раз больше θ_0'''. В данном случае, однако, при вычислении θ можно было бы отбросить последний член ряда (728); при вычислении r последние три члена ряда могли бы быть отброшены и производных θ_0^{VI}, r_0^{IV}, r_0^{V} и r_0^{VI} можно было бы не вычислять.

Диференцируя (728), получим:

$$\left.\begin{aligned} r' &= r_0' + r_0''t + r_0'''\frac{t^2}{2} + r_0^{IV}\frac{t^3}{6} + r_0^{V}\frac{t^4}{24} + r_0^{VI}\frac{t^5}{120} \\ \theta' &= \theta_0' + \theta_0''t + \theta_0'''\frac{t^2}{2} + \theta_0^{IV}\frac{t^3}{6} + \theta_0^{V}\frac{t^4}{24} + \theta_0^{VI}\frac{t^5}{120} \end{aligned}\right\} \qquad (737)$$

Используя полученные производные, вычисляем для $t_1 = 0{,}05$ сек. и $t_2 = 0{,}10$ сек. по формулам (737) значения скоростей:

$$r_1' = 5{,}97 \text{ м/сек.}, \qquad r_2' = 5{,}91 \text{ м/сек.},$$

$$\theta_1' = 569 \cdot 10^{-5} \text{ 1/сек.}, \quad \theta_2' = 215 \cdot 10^{-4} \text{ 1/сек.}$$

В данном случае при вычислении скоростей r' можно было бы отбросить последние три члена ряда, а при вычислении скоростей θ' последний член ряда.

Полученные значения путей r_0, r_1, r_2, θ_0, θ_1 и θ_2 и скоростей r_0', r_1', r_2', θ_0', θ_1' и θ_2' заносим в первые три строки табл. 90 и 91, в которых производится вычисление величин a_1, a_0, b_1 и b_0. Последние переписываются в табл. 92, где вычисляются ускорения r'' и θ''. При этом в первой строке r_0'' и θ_0'' должно получиться то же, что по начальным условиям (727). После этого значения r, r' и r'' первых трех строк вписываются в табл. 93, а значения θ, θ' и θ'' в табл. 94. В этих таблицах производится вычисление в третьей строке величин Δr_2, $\Delta r_2'$, $\Delta\theta_2$ и $\Delta\theta_2'$. Теперь можно вычислить r_3, r_3', θ_3 и θ_3' на основании зависимостей

$$r_{i+1} = r_i + \Delta r_i, \qquad r_{i+1}' = r_1' + \Delta r_i',$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta_i, \qquad \theta_{i+1}' = \theta_1' + \Delta\theta_i',$$

и эти значения нужно вписать в четвертые строки II—V столбцов табл. 90 и 91 и в четвертые строки II—III столбцов табл. 93 и 94. После этого можно произвести вычисления в четвертых строках всех таблиц и перейти тем же порядком к пятой строке. Таким образом, переходя от строки к строке, заполняют все таблицы до конца второго периода. Конец второго периода наступает, когда корпус корабля коснется поверхности воды. Этот момент лучше всего уста-

Таблица 90

Вычисление коэффициентов a_1 и a_0 формул (734)

t	r	θ	r'	θ'	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$(\beta-\alpha)$ VII = 0 · VII	VI + VIII	g · IX = 9,81 · IX	II — $H(\beta-\alpha)$ = II — 0	V²	XI · XII	$2\varkappa$IV · V = 0,4 IV · V	α II = 0,2 II	a_1=H—XV=4,15—XV	a_0 = X + XIII + XIV
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII
0	0	0	6,00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4,15	0
0,05	0,300	0,000095	5,98	0,00569	0,000095	1	0	0,000095	0,00093	0,300	0,0000324	0,00001	0,01362	0,06	4,09	0,01456
0,10	0,597	0,00075	5,91	0,0215	0,00075	1	0	0,00075	0,007	0,597	0,000462	0,0003	0,0508	0,12	4,03	0,0583
0,15	0,890	0,00247	5,81	0,0488	0,00247	1	0	0,00247	0,024	0,890	0,00238	0,002	0,113	0,18	3,97	0,139
0,20	1,170	0,00576	5,68	0,0842	0,00576	1	0	0,00576	0,057	1,170	0,00708	0,008	0,191	0,24	3,91	0,256
0,25	1,458	0,01096	5,53	0,1255	0,01096	1	0	0,01096	0,107	1,458	0,01576	0,023	0,278	0,29	3,86	0,408
0,30	1,730	0,01834	5,38	0,1703	0,01834	1	0	0,01834	0,180	1,730	0,0290	0,050	0,367	0,35	3,80	0,597
0,35	1,996	0,280	5,24	0,2172	0,0280	1	0	0,0280	0,275	1,996	0,0471	0,094	0,456	0,40	3,75	0,825
0,40	2,225	0,0401	5,12	0,264	0,0401	0,999	0	0,0401	0,392	2,255	0,0699	0,158	0,541	0,45	3,70	1,091
0,45	2,508	0,0544	5,01	0,310	0,0544	0,998	0	0,0544	0,534	0,508	0,0963	0,242	0,622	0,50	3,65	1,398
0,50	2,756	0,0711	4,93	0,354	0,0710	0,997	0	0,0710	0,697	2,756	0,1250	0,344	0,697	0,55	3,60	1,738

Таблица 91

Вычисление коэффициентов b_1 и b_0 формул (734)

t	r	θ	r'	θ'	$\sin\theta$	$\cos\theta$	II²	$2H\beta\cdot \mathrm{II} = 1,66\ \mathrm{II}$	$\beta\cdot \mathrm{VI} = 0,2\ \mathrm{VI}$	VII — X	II · XI	$H\cdot \mathrm{VI} = 4,15\cdot \mathrm{VI}$	XII + XIII	$g\ \mathrm{XIV} = 9,81\ \mathrm{XIV}$	$\mathrm{II} - H\beta = \mathrm{II} - 0,83$	2 IV · V · XVI	$b_1=\rho^2+H^2+\mathrm{VIII}-\mathrm{IX} = 30,22+\mathrm{VIII}-\mathrm{IX}$	$b_0 = \mathrm{XV} - \mathrm{XVII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX
0	0	0	6,00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	— 0,830	0	30,22	0
0,05	0,300	0,000095	5,98	0,00569	0,000095	1	0	0,50	0	1	0,300	0	0,300	2,94	— 0,530	— 0,04	29,81	2,98
0,10	0,597	0,00075	5,91	0,0215	0,00075	1	0	0,99	0	1	0,597	0,003	0,600	5,89	— 0,233	— 0,06	29,59	5,95
0,15	0,890	0,00247	5,81	0,0488	0,00247	1	0	1,48	0	1	0,890	0,010	0,900	8,83	+ 0,060	+ 0,03	29,53	8,80
0,20	1,177	0,00576	5,68	0,0842	0,00576	1	0	1,95	0,001	0,999	1,176	0,024	1,200	11,77	+ 0,347	+ 0,33	29,65	11,44
0,25	1,458	0,01096	5,53	0,1255	0,01096	1	0	2,42	0,002	0,398	1,455	0,045	1,490	14,62	+ 0,628	+ 0,87	29,92	13,75
0,30	1,730	0,01834	5,38	0,1703	0,01834	1	0	2,87	0,004	0,996	1,723	0,076	1,799	17,65	+ 0,900	+ 1,65	30,35	16,00
0,35	1,996	0,0280	5,24	0,2172	0,0280	1	0	3,31	0,006	0,994	1,983	0,116	2,10	20,59	+ 1,166	+ 2,67	30,90	17,92
0,40	2,255	0,0401	5,12	0,264	0,0401	0,999	0	3,75	0,008	0,991	2,235	0,166	2,40	23,55	+ 1,425	+ 3,86	31,56	19,69
0,45	2,508	0,0544	5,01	0,310	0,0544	0,998	0	4,16	0,011	0,987	2,475	0,226	2,70	26,49	+ 1,678	+ 5,21	32,36	21,28
0,50	2,756	0,0711	4,93	0,354	0,0711	0,997	0	4,57	0,014	0,983	2,710	0,295	3,01	29,47	+ 1,926	+ 6,71	33,24	22,76

Таблица 92

Вычисление ускорений r'' и θ''

t	a_1	a_0	b_1	b_0	$H \cdot II = 4{,}15 \cdot II$	IV—VI	III · IV	II · V	VIII—IX	H III = 4,15 III	V—XI	$r'' = \frac{X}{VII}$	$\theta'' = \frac{XII}{VII}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
0	4,15	0	30,22	0	17,22	13,00	0	0	0	0	0	0	0
0,05	4,09	0,01456	29,81	2,98	17,00	12,81	0,43	12,19	—11,78	0,06	2,92	—0,920	0,228
0,10	4,03	0,0583	29,59	5,95	16,73	12,86	1,73	24,00	—22,27	0,24	5,71	—1,733	0,444
0,15	3,97	0,139	29,53	8,80	16,48	13,05	4,11	34,34	—30,73	0,58	8,22	—2,355	0,629
0,20	3,91	0,256	29,65	11,44	16,23	13,42	7,60	44,73	—37,13	1,06	10,38	—2,77	0,773
0,25	3,86	0,408	29,92	13,75	16,02	13,90	12,21	53,09	—40,87	1,69	12,06	—2,94	0,868
0,30	3,80	0,597	30,35	16,00	15,78	14,57	18,13	60,80	—42,67	2,48	13,52	—2,93	0,927
0,35	3,75	0,825	30,90	17,92	15,58	15,32	25,49	67,20	—41,71	3,42	14,50	—2,72	0,947
0,40	3,70	1,091	31,56	19,69	15,36	16,20	34,40	72,8	—38,4	4,52	15,17	—2,37	0,937
0,45	3,65	1,398	32,36	21,28	15,15	17,21	45,20	77,7	—32,5	5,80	15,48	—1,89	0,900
0,50	3,60	1,738	33,24	22,76	14,95	18,29	57,7	81,9	—24,2	7,21	15,55	—1,32	0,850

Таблица 93

Вычисление пути r и линейной скорости r'

t	$r_{n+1} = \text{II}_n + \text{XI}_n$	$r'_{n+1} = \text{III}_n + \text{XVI}_n$	r''_n	$3\ \text{IV}_{n-2}$	$10\ \text{IV}_{n-1}$	$19\ \text{IV}_n$	$\text{V} - \text{VI} + \text{VII}$	$\frac{\Delta t}{24}\ \text{VIII} = \frac{\text{VIII}}{480}$	$\text{III} + \text{IX}$	$\Delta r_n = \Delta t \text{X} = \frac{\text{X}}{20}$	$5\ \text{IV}_{n-2}$	$16\ \text{IV}_{n-1}$	$23\ \text{IV}_n$	$\text{XII} - \text{XIII} + \text{XIV}$	$\Delta r'_n = \frac{\Delta t}{12}\ \text{XV} = \frac{\text{XV}}{240}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
0	0	6,00	0												
0,05	0,300	5,98	—0,920												
0,10	0,597	5,91	—1,733	0	—9,2	—32,9	—23,7	—0,049	5,86	0,293	0	—14,7	—39,8	—25,1	—0,105
0,15	0,890	5,81	—2,355	—2,8	—17,3	—44,8	—30,3	—0,063	5,74	0,287	—4,6	—27,7	—54,2	—31,1	—0,130
0,20	1,177	5,68	—2,77	—5,2	—23,6	—52,6	—34,2	—0,071	5,61	0,280	—8,7	—37,7	—63,7	—34,7	—0,145
0,25	1,457	5,53	—2,94	—7,1	—27,7	—55,9	—35,3	—0,074	5,46	0,273	—11,8	—44,4	—67,6	—35,0	—0,146
0,30	1,730	5,38	—2,93	—8,3	—29,4	—55,7	—34,6	—0,072	5,31	0,266	—13,9	—47,1	—67,4	—34,2	—0,142
0,35	1,996	5,24	—2,72	—8,8	—29,3	—51,7	—31,2	—0,065	5,18	0,259	—14,7	—46,9	—62,6	—30,4	—0,127
0,40	2,255	5,12	—2,37	—8,8	—27,2	—45,1	—26,7	—0,056	5,06	0,253	—14,7	—43,5	—54,5	—25,7	—0,107
0,45	2,508	5,01	—1,89	—8,2	—23,7	—35,9	—20,4	—0,043	4,97	0,248	—13,6	—37,9	—43,5	—19,2	—0,080
0,50	2,756	4,93	—1,32	—7,1	—18,9	—25,1	—13,3	—0,028	4,90	0,245	—11,9	—30,2	—30,4	12,1	—0,050

Таблица 94

Вычисление углов θ и угловых скоростей θ′

t	$\theta_{n+1} = \text{II}_n + \text{XI}_n$	$\theta'_{n+1} = \text{III}_n + \text{XVI}_n$	θ''_n	$3\,\text{IV}_{n-2}$	$10\,\text{IV}_{n-1}$	$19\,\text{IV}_n$	V — VI + VII	$\frac{\Delta t}{24}\,\text{VIII} = \frac{\text{VIII}}{480}$	III + IX	$\Delta\theta_n = \Delta t\,\text{X} = \frac{\text{X}}{20}$	$5\,\text{IV}_{n-2}$	$16\,\text{IV}_{n-1}$	$23\,\text{IV}_n$	XII — XIII + XIV	$\Delta\theta'_n = \frac{\Delta t}{12}\,\text{XV} = \frac{\text{XV}}{240}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
0	0	0	0												
0,05	0,000095	0,00569	0,228												
0,10	0,00075	0,0215	0,444	0	2,28	8,45	6,17	0,0129	0,0344	0,00172	0	3,65	10,21	6,56	0,0273
0,15	0,00247	0,0488	0,629	0,68	4,44	11,95	8,19	0,0171	0,0659	0,00329	1,14	7,11	14,48	8,51	0,0354
0,20	0,00576	0,0842	0,773	1,33	6,29	14,68	9,72	0,0202	0,1044	0,00522	2,22	10,08	17,78	9,92	0,0413
0,25	0,01098	0,1255	0,868	1,89	7,73	16,49	10,65	0,0222	0,1477	0,00738	3,15	12,37	19,97	10,75	0,0448
0,30	0,01836	0,1703	0,927	2,32	8,68	17,61	11,25	0,0234	0,1937	0,00968	3,87	13,90	21,31	11,28	0,0469
0,35	0,0280	0,2172	0,947	2,69	9,27	17,99	11,32	0,0236	0,2408	0,01204	4,34	14,83	21,78	11,29	0,0470
0,40	0,0400	0,264	0,937	2,78	9,47	17,80	11,11	0,0232	0,287	0,0144	4,64	15,16	21,55	11,03	0,046
0,45	0,0544	0,310	0,900	2,84	9,37	17,10	10,57	0,0220	0,332	0,0166	4,74	15,00	20,70	10,44	0,044
0,50	0,0710	0,354	0,850	3,81	9,00	16,15	9,96	0,0207	0,375	0,0188	4,69	14,40	19,55	9,84	0,041

новить графически, исходя из получающихся значений r и θ. Приводимые здесь табл. 90—94 заполнены вычислениями для упомянутого выше корабля.

Точность вычисления определяется величиной разностей. В данном случае, если третьи разности r^{II} и θ^{II} малы, а вторые почти постоянны, то можно считать точность вычислений достаточной. Практически в этом расчете, как было указано выше, нет смысла добиваться большой точности, так как величина коэффициента динамического трения точно не известна. Если же по каким-либо соображениям необходимо будет повысить точность, то можно воспользоваться следующими рабочими формулами:

$$\left.\begin{aligned}\Delta r'_n &= \frac{\Delta t}{24}\left(-9r''_{n-3} + 37r''_{n-2} - 29r''_{n-1} + 55r''_n\right)\\ \Delta\theta'_n &= \frac{\Delta t}{24}\left(-9\theta''_{n-3} + 37\theta''_{n-2} - 29\theta''_{n-1} + 55\theta''_n\right)\end{aligned}\right\} \quad (738)$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta r_n &= \Delta t r'_n + \frac{\Delta t^2}{360}\left(-38r''_{n-3} + 159r''_{n-2} - 264r''_{n-1} + 323r''_n\right)\\ \Delta\theta_n &= \Delta t\theta'_n + \frac{\Delta t^2}{360}\left(-38\theta''_{n-3} + 159\theta''_{n-2} - 264\theta''_{n-1} + 323\theta''_n\right)\end{aligned}\right\} \quad (739)$$

В этом случае для того, чтобы начать вычисления, нужно заполнить четыре первые строки табл. 90—94. Поэтому следует произвести вычисления по формулам (728) и (737) для значений времени:

$$t_0 = 0, \quad t_1 = 0{,}05 \text{ сек.}, \quad t_2 = 0{,}10 \text{ сек.}, \quad t_3 = 0{,}15 \text{ сек.}$$

Рабочие формулы (738) и (739) выведены в предположении, что четвертые разности r'' и θ'' малы, а третьи почти постоянны, поэтому они дадут более высокую точность вычислений. Повышение точности может быть получено также при использовании рабочих формул (732) и (733) за счет уменьшения промежутка интегрирования до $\Delta t = 0{,}025$ сек.

Конец второго периода может быть установлен практически, как было указано выше, а также по графику (рис. 118), используя на нем кривую $W = 0$. Имея значения r и θ для второго периода, вычисленные в табл. 93 и 94, нужно подобрать такую пару значений величин r и θ, чтобы, отложив их по осям абсцисс и ординат и проведя затем вертикаль и горизонталь, получить точку пересечения на кривой $W = 0$.

§ 80. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕТЬЕГО ПЕРИОДА БОКОВОГО СПУСКА

Диференциальные уравнения движения судна в третьем периоде в обобщенных координатах в форме, предложенной С. Н. Благовещенским, будут отличаться от уравнений второго периода членами,

учитывающими пловучесть и сопротивление воды, и представятся так:

$$\left.\begin{aligned} r'' + a_1\theta'' &= a_0 \\ Hr'' + b_1\theta'' &= b_0 \end{aligned}\right\} \qquad (740)$$

где

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= H - rf_d \\ a_0 &= g[\sin\theta + (\beta - f_d)\cos\theta] + \theta'^2 [r - H(\beta - f_d)] + 2f_d r'\theta'] - \\ &- \frac{0{,}7\frac{\gamma}{g} Sl_2^2 \cdot \theta'^2 + \gamma W}{D_c} g[\sin\theta + (\beta - f_d)\cos\theta] - \frac{0{,}7\gamma F r'^2}{D_c} \\ b_1 &= \rho^2 + H^2 + r^2 - 2H\beta r \\ b_0 &= g[r(\cos\theta - \beta\sin\theta) + H\sin\theta] - 2r'\theta'(r - H\beta) - \\ &- g\frac{\gamma Wl + 0{,}7\frac{\gamma}{g}(F l_1 r'^2 + Sl_2^3\theta'^2)}{D_c} \end{aligned}\right\} \qquad (741)$$

Здесь, кроме известных из предыдущего параграфа обозначений, введены еще следующие (рис. 117):

γW — сила пловучести;

S — площадь действующей ватерлинии;

F — проекция поверхности погруженной части корпуса на плоскость, перпендикулярную к направлению r;

l — плечо силы пловучести γW относительно порога;

l_1 — расстояние от центра тяжести площади F до нижней поверхности полозьев, измеренное перпендикулярно к последней;

l_2 — расстояние от центра тяжести площади ватерлинии S до порога, измеренное в горизонтальной плоскости.

Все перечисленные выше величины являются функциями r и θ и связь их с r и θ может быть установлена только в графическом виде путем вычислений, выполненных по теоретическому чертежу. Для этого при некотором значении r повернем судно вместе с полозьями около порога на некоторый угол θ так, чтобы оно коснулось горизонта воды. Затем, не меняя угла θ, несколько увеличим r; тогда судно войдет в воду и можно будет вычислить для этого положения (с помощью интегратора) W и l и, снимая соответствующие ординаты с теоретического чертежа, S и l_2, а также F и l_1. Проделав таким образом ряд вычислений при постоянном угле θ и переменном r, переходим к другим постоянным значениям угла θ и тем же порядком выполняем все вычисления. В результате получается ряд зависимостей интересующих нас величин W, l, F, l_1, S и l_2 от r при постоянных значениях θ. Эти зависимости могут быть представлены в виде графиков. Для большего удобства эти графики нужно затем перестроить так, чтобы они содержали линии равных значений W, Wl, F, Fl_1, S и Sl_2, по оси абсцисс были бы отложены расстояния r, а по оси ординат углы θ.

На рис. 118—121 представлены зависимости $\theta = f(r)$ при постоянном W (рис. 118), постоянном Wl (рис. 119), постоянном S

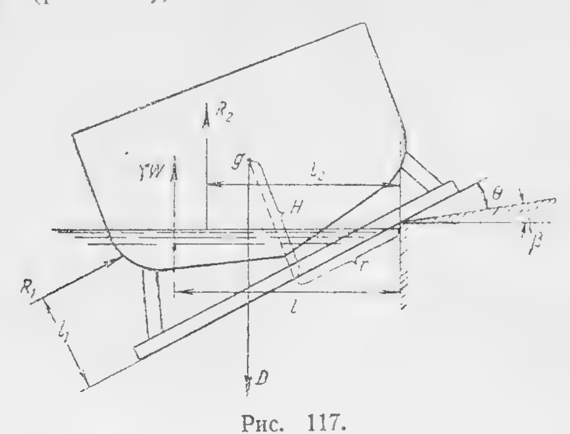


Рис. 117.

(рис. 120) и постоянном Sl_2 (рис. 121). С помощью этих графиков, зная положение корабля, т. е. r и θ, можно определить W, Wl, S

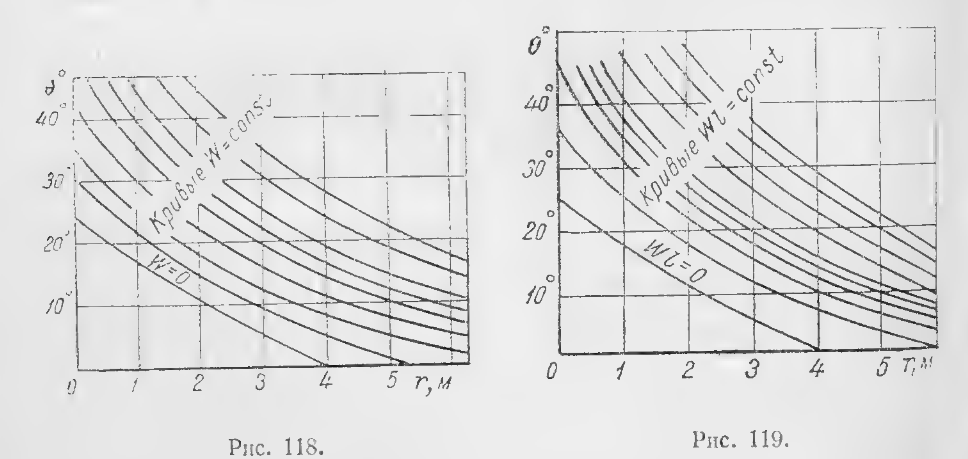


Рис. 118. Рис. 119.

и Sl_2. Остается найти F и Fl_1, которые могут быть определены с помощью следующих простых зависимостей:

$$\left.\begin{aligned} F &= S\sin(\theta + \beta) \\ Fl_1 &= Sl_2\sin^2(\theta + \beta). \end{aligned}\right\} \quad (742)$$

Эти зависимости приближенные, но для наших целей достаточно точные, так как коэффициенты сопротивления воды движению корабля в третьем периоде, введенные в уравнения движения в виде постоянных чисел, нам точно неизвестны и поэтому нет смысла точно определять другие характеристики.

Численное интегрирование диференциальных уравнений третьего периода следует вести в той же табличной форме, как и решение

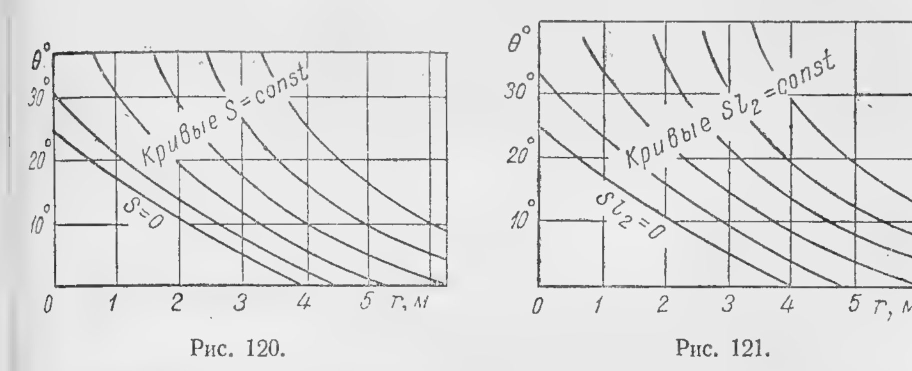


Рис. 120. Рис. 121.

уравнений второго периода. При этом необходимо иметь в виду, что в соответствии с формулами (741), табл. 90 и 91, служащие

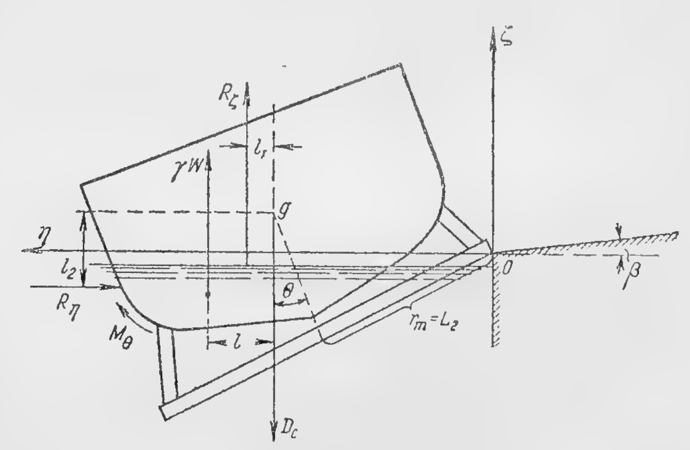


Рис. 122.

для вычисления величин a_1, a_0, b_1 и b_0, следует несколько изменить, добавив в табл. 90 столбцы для вычисления членов

$$\frac{0{,}7\frac{\gamma}{g}Sl_2^2\theta'^2+\gamma W}{D_c}\,g\,[\sin\theta+(\beta-f_d)\cos\theta]$$

и

$$\frac{0{,}7\,\gamma\,Fr'^2}{D_c},$$

а в табл. 91 столбцы для вычисления члена

$$g\,\frac{\gamma Wl+0{,}7\frac{\gamma}{g}(Fl_1r'^2+Sl_2^3\theta'^2)}{D_c},$$

так как выражения для a_0 и b_0 в третьем периоде отличаются от выражений для этих величин во втором. Табл. 92—94 остаются для третьего периода без изменения. Принцип заполнения таблиц и порядок вычислений такой же, как и для второго периода.

Величины W, Wl, S и Sl_2 снимаются с диаграмм (рис. 118—121) для каждой строки в зависимости от текущих значений r и θ. При этом F и Fl_1 вычисляются по формулам (742), а

$$l_2 = \frac{Sl_2}{S}$$

и

$$l_1 = \frac{Fl_1}{F}.$$

Третий период заканчивается, когда $r = L_2$.

§ 81. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЧЕТВЕРТОГО ПЕРИОДА БОКОВОГО СПУСКА

Принимая за начало координат верхнюю грань порога — точку O (рис. 122) и направляя ось $O\zeta$ по вертикали вверх и ось $O\eta$ по горизонтали в направлении движения судна, будем иметь три параметра η, ζ и θ, определяющие положение центра тяжести и угол крена. Диференциальные уравнения движения, при допущениях, предложенных Н. А. Николаевым, напишутся так:

$$\eta'' + 0{,}55\frac{\gamma F}{D_c}\eta'^2 = 0, \qquad (743)$$

$$\zeta'' + \frac{\gamma S_0 g}{D_c}\zeta = -0{,}137\frac{\gamma S_0 \zeta_0'^2}{D_c}, \qquad (744)$$

$$\theta'' + \frac{Dh}{I_0}\theta = 0. \qquad (745)$$

Уравнение (743) выведено в предположении, что сопротивление поступательному движению пропорционально проекции F поверхности погруженной части корпуса на плоскость, перпендикулярную к направлению поступательного движения, и квадрату скорости поступательного движения η'^2. При этом F рассматривается как постоянная величина и выражается так:

$$F = L \cdot T_{\text{ср}},$$

где L — длина судна, а $T_{\text{ср}}$ — средняя осадка, соответствующая водоизмещению D_c.

Уравнение (744) выведено в предположении, что судно прямостенное и погружается с креном, который оно получило к концу третьего периода, а сопротивление погружению пропорционально площади ватерлинии S_0 в конце третьего периода и квадрату вертикальной скорости ζ'^2, при этом считаем, что скорость ζ' изменяется от максимального своего значения ζ_0' в начале четвертого периода

до нуля по линейному закону и поэтому заменяем скорость ζ' ее средним значением $\zeta'_0/2$, т. е. считаем силу сопротивления воды вертикальным перемещениям постоянной.

Уравнение (745) выведено в предположении, что колебания судна происходят вокруг его центра тяжести и в равновесном положении, восстанавливающий момент пропорционален углу крена и метацентрической высоте, а сопротивление колебаниям отсутствует.

Первый интеграл уравнения (743) будет

$$\eta' = \frac{\eta'_0}{0{,}55\,\frac{\gamma F}{D_c}\,\eta'_0 t + 1} \tag{746}$$

и второй интеграл

$$\eta = \frac{D_c}{0{,}55\gamma F}\ln\left(0{,}55\,\frac{\gamma F}{D_c}\,\eta'_0 t + 1\right) + \eta_0$$

или

$$t = \frac{e^{0{,}55\,\frac{\gamma \cdot F}{D_c}(\eta - \eta_0)} - 1}{0{,}55\,\frac{\gamma F}{D_c}\,\eta'_0}. \tag{747}$$

При этом начальное значение абсциссы η_0 вычисляется по формуле:

$$\eta_0 = L_2\cos(\theta_m + \beta) + H\sin\theta_m, \tag{748}$$

где θ_m — угол, соответствующий концу третьего периода, а начальная скорость η'_0 по формуле:

$$\eta'_0 = r'_m\cos(\theta_m + \beta) - L_2\theta'_m\sin(\theta_m + \beta) + H\theta'_m\cos\theta_m. \tag{749}$$

Здесь r'_m и θ'_m значения поступательной и угловой скоростей в конце третьего периода.

С помощью формул (746)—(749) можно определить, с какой скоростью судно дойдет до противоположного берега той акватории, в которую оно спускается. Этот вопрос имеет большое значение в том случае, если акватория ограниченная и для предотвращения удара необходимо предусмотреть то или иное приспособление.

Порядок расчета таков. Вычисляем сначала по формулам (748) и (749) η_0 и η'_0. Подставляя их затем в формулу (747) и задаваясь шириной акватории η, вычисляем время t, необходимое судну, чтобы дойти до противоположного берега. Наконец, подставляя полученное время t и η'_0 в формулу (746), получаем скорость η', с которой судно придет к противоположному берегу. По величине полученной скорости можно судить, необходимо ли в данном случае применить задерживающее устройство или нет.

Общий интеграл уравнения (744) будет:

$$\zeta = N\cos\left(\sqrt{\frac{\gamma S_0 g}{D_c}}\,t + \varepsilon\right) - 0{,}137\,\frac{\zeta_0'^2}{g}. \tag{750}$$

Постоянные интегрирования N и ε, определяемые из начальных условий, будут

$$N=\sqrt{\left(0,137\frac{\zeta_0'^2}{g}+\zeta_0-\zeta_p\right)^2+\frac{\zeta_0'^2 D_c}{\gamma S_0 g}}$$

$$\varepsilon=\operatorname{arc\,tg}\left(-\frac{0,137\frac{\zeta_0'^2}{g}+\zeta_0-\zeta_p}{\zeta_0'}\sqrt{\frac{\gamma S_0 g}{D_c}}\right).$$

При этом начальное значение ординаты ζ_0 вычисляется по формуле

$$\zeta_0=-L_2\sin(\theta_m+\beta)+H\cos\theta_m,$$

а начальная скорость ζ_0' по формуле:

$$\zeta_0'=-r_m'\sin(\theta_m+\beta)-L_2\theta_m'\cos(\theta_m+\beta)-H\theta_m'\sin\theta_m;$$

ζ_p — ордината центра тяжести судна в состоянии равновесия.

Наибольшее погружение центра тяжести судна наступит, когда в уравнении (750) cos обратится в единицу, т. е. будем иметь

$$\zeta_{max}=\sqrt{\left(0,137\frac{\zeta_0'^2}{g}+\zeta_0-\zeta_p\right)^2+\frac{\zeta'^2 D_c}{\gamma S_0 g}}-0,137\frac{\zeta_0'^2}{g} \qquad (751)$$

и наибольшее погружение переднего конца полоза будет

$$h_{max}=\zeta_{max}+(T_{cp}+c)\cos\theta_m+L_1\sin(\theta_m+\beta). \qquad (752)$$

Время, по прошествии которого передний конец полоза погрузится на величину h_{max}, определится по формуле:

$$t=(\pi-\varepsilon)\sqrt{\frac{D_c}{\gamma S_0 g}}. \qquad (753)$$

Отстояние переднего конца полоза от порога при наибольшем его погружении h_{max} будет:

$$\eta_m=\eta+L_1\cos(\theta_m+\beta)-H\sin\theta_m, \qquad (754)$$

где η вычисляется по формуле:

$$\eta=\frac{D_c}{0,55\gamma F}\ln\left(0,55\frac{\gamma F}{D_c}\eta_0' t+1\right)+\eta_0, \qquad (755)$$

исходя из времени t, вычисленного по формуле (753), а η_0 и η_0' определяются по формулам (748) и (749).

Общее решение уравнения (745) будет:

$$\theta=M\cos\left(\sqrt{\frac{Dh}{I_c}}t+\varepsilon_1\right), \qquad (756)$$

где постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий, будут

$$M = \sqrt{\theta_m^2 + \frac{\theta_m'^2 I_0}{Dh}};$$

$$\varepsilon_1 = \operatorname{arc\,tg}\left(-\frac{\theta_m' \sqrt{I_0}}{\theta_m \sqrt{Dh}}\right).$$

Максимальный угол крена в сторону стапеля получится, когда cos в формуле (756) обратится в единицу.

Тогда

$$\theta_{max} = \sqrt{\theta_m^2 + \frac{I_0 \theta_m'^2}{Dh}}, \tag{757}$$

где θ_m и θ_m' соответствуют концу третьего периода.

На основании полученных выше зависимостей можно сделать заключение о том, последует ли удар бортом судна о порог стапеля или нет. Для этого нужно знать положение центра тяжести судна в момент наибольшего угла крена в сторону стапеля.

Время, которое пройдет с начала четвертого периода до того момента, как судно получает первое максимальное наклонение в сторону стапеля, определится по формуле:

$$t = (\pi - \varepsilon_1) \sqrt{\frac{I_0}{Dh}}. \tag{758}$$

Время, вычисленное по формуле (758), подставляем в уравнение (755) и таким образом получаем горизонтальное отстояние центра тяжести судна от порога η_n. Вертикальное отстояние возьмем с некоторым запасом, как сумму

$$\zeta_n = \zeta_p + \zeta_{max}, \tag{759}$$

где ζ_{max} вычисляется по формуле (751).

Если выполняется условие

$$\eta_n \geqslant \frac{B}{2 \cos \theta_{max}} + \zeta_n \operatorname{tg} \theta_{max}, \tag{760}$$

то удара о порог не произойдет. Здесь B — ширина судна.

Для того чтобы не было удара о порог стапеля, нужно выдержать следующее приближенное соотношение для длины L_2 заднего конца полоза:

$$L_2 \geqslant \frac{B + \zeta_p \sin \theta_{max} - 2H \sin \theta_m \cos \theta_{max}}{2 \cos \theta_{max} \cos (\theta_m + \beta)}. \tag{761}$$

Здесь θ_m соответствует концу третьего периода, а θ_{max} — четвертому периоду.

ГЛАВА VI

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРАКТИЧЕСКИМ ПРИМЕНЕНИЕМ УЧЕНИЯ ОБ ОСТОЙЧИВОСТИ

§ 82. ВНЕШНИЕ СИЛЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ КРЕН СУДНА

Внешние усилия, вызывающие крен судна, могут возникать от разнообразных причин. К главнейшим видам кренящих усилий относятся:

1. Кренящие моменты, создаваемые действием ветровой нагрузки.
2. Возмущающие моменты, вызываемые действием волн.
3. Моменты от несимметричности или неправильности нагрузки.
4. Моменты от действия инерционных и иных сил при совершении кораблем циркуляции.
5. Моменты от рывка буксирного троса у буксирных судов.
6. Моменты от реактивных сил отдачи при артиллерийской стрельбе.
7. Моменты от перемещающихся в поперечном направлении грузов.
8. Кренящие моменты, появляющиеся в результате аварии судна и др.

В большинстве случаев кренящие моменты создаются в результате совместного действия на судно сил, имеющих разную природу и к тому же меняющихся во времени. Так, например, при действии на корабль давления ветра при шквале кренящий момент создается в результате совместного влияния давления ветра, гидромеханических и инерционных сил. Исследование поведения корабля при действии этих сил представляет весьма сложную задачу, не получившую до настоящего времени исчерпывающего и точного решения.

Аналогичные условия имеют место и при действии ряда других категорий внешних сил. Поэтому расчет крена корабля во многих случаях бывает весьма приближенным, а иногда и чисто условным, причем разные авторы предлагают различные методы и схемы расчета.

§ 83. РАСЧЕТ КРЕНЯЩИХ МОМЕНТОВ ОТ ДЕЙСТВИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

Силу ветра в мореплавании принято оценивать в баллах по шкале Бофорта, дающей соотношение между скоростью ветра и баллом по 12-бальной шкале. Опубликованные в литературе шкалы Бофорта

часто не совпадают между собой, так как различные авторы предлагали различные соотношения между баллами и скоростью.

В табл. 95 приведены средние скорости ветра по шкале Бофорта, употребляемой в настоящее время в СССР и принятой международной метеорологической комиссией в 1926 г. В метеорологии она носит также название нормальной шкалы Симпсона. Величины скорости ветра относятся к стандартной высоте 6 *м* над открытой местностью или над поверхностью моря. В таблице даны нижний и верхний пределы средних скоростей ветра, соответствующие данному баллу. Увеличение скорости при порыве ветра или шквале принято

$$v_{шк} = (1,9 \div 1,6)\, v_{ср}, \qquad (762)$$

где $v_{ср}$ — соответствует верхнему пределу указанных в табл. 95 скоростей;

1,9 — коэффициент, соответствующий малым скоростям ветра;

1,6 — коэффициент, соответствующий большим скоростям ветра.

Для промежуточных значений скоростей ветра коэффициент интерполируется.

Давление ветра в таблице подсчитано по формуле:

$$p = C_y \frac{\rho v^2}{2} \cong \frac{1,3 v^2}{16}, \qquad (763)$$

где C_y — безразмерный коэффициент, составляющий по данным продувок надводных поверхностей судна $C_y \cong 1,3$ при массовой плотности воздуха около $\rho = 0,125$ *кг/м*^{4} сек.^{2}. Для статического

Таблица 95

Шкала Бофорта

Баллы	Наименование ветра	Скорость (*м*/сек.) на высоте 6 *м* над поверхностью моря		Давление (*кг/м*^{2}) на высоте 6 *м* над поверхностью моря	
		средняя	при шквале	среднее	при шквале
0	Штиль	0— 0,5	1,0	0	0,1
1	Тихий ветер	0,6— 1,7	3,2	0,2	0,8
2	Легкий ветер	1,8— 3,3	6,2	0,9	3,1
3	Слабый ветер	3,4— 5,2	9,6	2,2	7,5
4	Умеренный ветер	5,3— 7,4	13,6	4,5	15,0
5	Свежий ветер	7,5— 9,8	17,8	7,8	25,7
6	Сильный ветер	9,9—12,4	22,2	12,5	40,0
7	Крепкий ветер	12,5—15,2	26,8	18,8	58,4
8	Очень крепкий ветер	15,3—18,2	31,6	27,0	81,3
9	Шторм	18,3—21,5	36,7	37,5	109,7
10	Сильный шторм	21,6—25,1	42,0	51,1	143,5
11	Жестокий шторм	25,2—29,0	47,5	68,4	183,5
12	Ураган	$>$29,0	53,0	89,5	229,0

действия ветра значение v при вычислении давления принимается по верхнему пределу средней скорости, для шквала или порыва ветра принимается скорость шквала.

Средняя скорость ветра по официальной шкале при урагане не определяется и указывается, что она превышает 29 *м*/сек. При определении давления ветра и скорости при шквале она принята равной 33 *м*/сек.

При изменении высоты над поверхностью моря скорость ветра также изменяется. Изменение скорости по высоте может быть определено по логарифмической формуле, представляющей частный случай формулы Д. Л. Лайхтмана:

$$v = v_6 \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_6}{z_0}}, \tag{764}$$

где v_6 — табличная скорость ветра на высоте 6 *м* над поверхностью моря;

z_0 — характеристика шероховатости, принимаемая 0,002 *м*.

z — высота над поверхностью моря.

Отношение давления ветра p_i на высоте z к табличному давлению p_6 на высоте $z_6 = 6$ *м* пропорционально квадрату отношения скоростей. На рис. 123 изображен график отношения $\frac{p_i}{p_6}$, характеризующий изменение давления с высотой.

Характер изменения скорости и давления ветра во времени при сильных шквалах изучен недостаточно. Наблюдениями М. И. Гольцмана над сильным ветром, достигающим скорости до 35 *м*/сек., установлено, что скорость при порыве может в течение единичных (одной, двух) секунд возрасти от нуля до максимума, но затем она обычно снижается, пульсируя около среднего значения.

При вычислении силы давления ветра направление его принимается перпендикулярным к диаметральной плоскости судна в прямом положении.

Сила давления ветра равна произведению удельного давления ветра на площадь парусности с учетом изменения давления ветра по высоте и коэффициентов обтекания различных участков площади парусности. Под площадью парусности судна понимается площадь проекции надводной его части на диаметральную плоскость до той осадки, для которой построена диаграмма остойчивости.

В площадь парусности зачитывается проекция всех сплошных стенок и поверхностей на диаметральную плоскость, проекции лееров, рангоута и такелажа, проекции дымовых труб, башен, орудийных установок, проекции боковых поверхностей палубных грузов и т. д.

При вычислении парусности несплошных поверхностей, как то: рангоута, такелажа, лееров, затянутых сеткой, крановых ферм решетчатого типа и т. п. зачитываемые габаритные площади умножаются на коэффициенты заполнения, значения которых по рекомендации Морского Регистра СССР принимаются следующими:

Для леєров, затянутых сеткой, $f = 0{,}5-0{,}75$ в зависимости от частоты сетки. Для кранов решетчатого типа $f = 0{,}2-0{,}5$ в зависимости от частоты решетки.

Для рангоута, снастей и вант значения коэффициентов заполнения могут быть получены по данным Морского Регистра СССР с помощью табл. 96 в зависимости от отношения h/b, где h — высота мачты над фальшбортом, b — величина разноса вант у фальшборта.

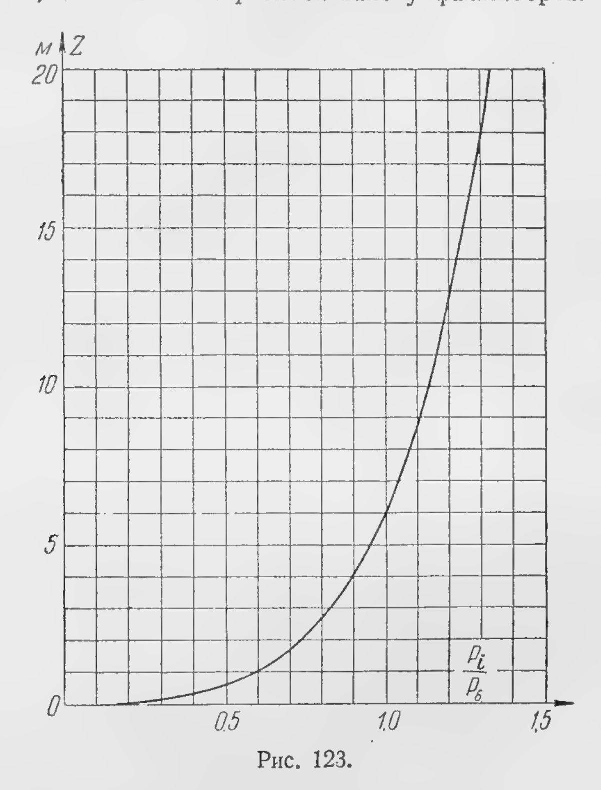


Рис. 123.

Предельную высоту обледенения при вычислении парусности Морской Регистр СССР рекомендует принимать до высоты 10 *м* над ватерлинией при прямом положении судна.

Проекции надводной части корпуса, рубок, надстроек нормального типа, рангоута, такелажа, леєров засчитываются с коэффициентом обтекания $k = 1{,}0$.

Площади проекций отдельно стоящих частей круглого сечения (трубы, вентиляторы и т. п.) принимаются с коэффициентом обтекания $k = 0{,}6$.

Площади крановых ферм решетчатого сечения засчитываются с коэффициентом обтекания $k = 1{,}5$.

Коэффициенты обтекания надстроек обтекаемой формы принимаются по данным продувки моделей надстроек в аэродинамической трубе,

Таблица 96

Коэффициенты заполнения рангоута

Отношение $\frac{h}{b}$	Коэффициенты заполнения для судов:		Отношение $\frac{h}{b}$	Коэффициенты заполнения для судов:	
	нормальных	арктического плавания при обледенении		нормальных	арктического плавания при обледенении
3	0,14	0,27	9	0,40	0,76
4	0,18	0,34	10	0,44	0,84
5	0,23	0,44	11	0,48	0,91
6	0,27	0,51	12	0,52	1,00
7	0,31	0,59	13	0,57	1,00
8	0,35	0,66	14	0,61	1,00

либо по результатам продувок близких по форме геометрических тел.

Равнодействующая сила давления ветра и момент ее определяются по формулам:

$$P = p_6 \sum f_i k_i \frac{p_i}{p_6} S_i, \tag{765}$$

где p_6 — табличное давление ветра по шкале Бофорта, относящееся к высоте 6 *м* над поверхностью моря. При рассмотрении статического действия ветра по таблице берется среднее значение давления, при рассмотрении динамического действия — давление при шквале;

S_i — составляющие участки площади парусности;

k_i — коэффициенты обтекания;

f_i — коэффициенты заполнения;

p_i/p_6 — коэффициенты возрастания давления ветра с высотой, определяемые по графику рис. 123 в функции от возвышения $z = Z_i - T$ над ватерлинией, где Z_i — высота геометрического центра тяжести площади S_i над основной плоскостью. Выражение Σ, стоящее множителем при табличном значении давления ветра, может быть названо приведенной площадью парусности:

$$S_0 = \sum f_1 k_i \frac{p_i}{p_6} S_i. \tag{766}$$

При вычислении площади парусности надводной части корпуса в случае значительного надводного борта высота его должна быть разбита на участки так, чтобы высота каждого участка не превосходила 2,5 *м*.

Момент силы давления ветра относительно основной плоскости равен

$$M_p = p_6 \sum f_i k_i \frac{p_i}{p_6} S_i Z_i. \tag{767}$$

Выражение, стоящее множителем при p_6, может быть названо приведенным моментом площади парусности

$$m_s = \sum f_i k_i \frac{p_i}{p_6} S_i Z_i. \qquad (768)$$

Схема расчета приведенной площади парусности и ее момента приводится в табл. 97.

В случае необходимости расчета парусности при нескольких видах водоизмещения полезно иметь в виду, что цифры табл. 97 по VIII столбец включительно не зависят от осадки для всех строк, за исключением строки 1, относящейся к участку площади парусности надводной части корпуса, прилегающему к ватерлинии.

При проверке достаточности остойчивости на действие ветра по временным нормам Морского Регистра СССР предполагается, что условное давление ветра распределено равномерно по всей приведенной площади парусности, но величина его зависит от возвышения центра парусности над ватерлинией. При этом предполагается, что центр парусности совпадает с геометрическим центром тяжести приведенной площади. В этом случае условная сила давления ветра и момент ее относительно плоскости ватерлинии определяются формулами:

$$P = p_z \sum f_i k_i S_i; \qquad (769)$$

$$M_p = p_z \sum f_i k_i S_i (Z_i - T), \qquad (770)$$

где p_z — величина условного давления ветра.

Нормы Морского Регистра СССР регламентируют величину p_z в зависимости от категории судна и от возвышения центра парусности над ватерлинией, определяемого по формуле

$$Z_s - T = \frac{\sum f_i k_i S_i (Z_i - T)}{\sum f_i k_i S_i}. \qquad (771)$$

Категория судна устанавливается в зависимости от района плавания, причем все суда разделяются на три категории.

Категория 1-я. Суда неограниченного морского плавания с удалением от берега свыше 100 миль.

Категория 2-я. Суда с ограниченным до 100 миль от берега районом плавания.

Категория 3-я. Суда с ограниченным до 20 миль от защищенного порта районом морского плавания и суда рейдовые.

Условное расчетное давление ветра p_z в килограммах на квадратный метр площади парусности приводится в табл. 98.

Значения условного давления получены путем статистической обработки расчетов, выполненных для нескольких десятков судов, и до высоты $Z_s - T = 4{,}5$ *м* весьма приблизительно соответствуют шквалу силой 12, 10 и 8 баллов для судов 1-й, 2-й и 3-й категорий соответственно.

Таблица 97

Вычисление приведенной площади парусности

№ п/п.	Наименование участков площади парусности	Площадь S_i	Коэффициент заполнения f_i	Коэффициент обтекания k_i	Произведение III · IV · V $= S_i f_i k_i$	Возвышение ЦТ площади над основной Z_i	Произведение VI · VII $= S_i f_i k_i Z_i$	Возвышение ЦТ площади над ватерлинией $Z_i - T$	Коэффициент возрастания давления $\frac{p_i}{p_6}$	Приведенные площади парусности VI · X	Приведенные моменты площади парусности VIII · X
		$м^2$	—	—	$м^2$	$м$	$м^3$	$м$	—	$м^2$	$м^3$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Надводный борт										
2	Бак										
3	Ют										
4	Рубки										
5											
6											
7											
	Суммы					$Z_s = \frac{m_s}{S_0}$				$S_0 = \sum_1$	$m_s = \sum_2$

При значениях Z_s, превышающих 4,5 *м*, величины давлений ветра по табл. 98 должны рассматриваться как чисто условные.

Таблица 98

Условное давление ветра по временным нормам Морского Регистра

Категория судна	Возвышение центра парусности над ватерлинией													
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0 и выше
Первая	—	120	150	175	195	210	225	240	250	265	275	290	300	310
Вторая	—	90	105	120	135	145	155	165	170	180	190	195	200	205
Третья	36	48	56	64	72	79	85	91	95	100	—	—	—	—

При еще более приближенных и условных расчетах влияние изменения скорости и давления ветра с высотой вовсе не учитывается и сила давления ветра и момент ее относительно плоскости ватерлинии вычисляются по формулам:

$$P = p_б \sum f_i k_i S_i, \qquad (772)$$

$$M_p = p_б \sum f_i k_i S_i (Z_i - T), \qquad (773)$$

где $p_б$ — статическое (среднее) или динамическое (при шквале) давление ветра, взятое для соответствующего балла непосредственно по шкале Бофорта, прочие обозначения имеют такой же смысл, как и в формулах (769) и (770). Схема расчета приведенной площади парусности и момента ее по формулам (769) и (770) или (772) и (773) приведена в табл. 99.

В случае необходимости расчета при нескольких видах водоизмещения, расчет по схеме табл. 99 достаточно выполнять для наименьшего водоизмещения. Площадь парусности второго водоизмещения уменьшается на величину снижения площади надводного борта

$$\Delta S_2 = L_1 (T_2 - T_1), \qquad (774)$$

где L_1 — длина ватерлинии по осадку T_1 при первом водоизмещении;
T_2 — осадка при втором водоизмещении.

В дальнейшем индекс 1 относится к первому водоизмещению, индекс 2 — ко второму.

Ордината ЦТ площади ΔS_2 от первой ватерлинии:

$$Z_{\Delta S_2} = \frac{1}{2} (T_2 - T_1). \qquad (775)$$

Приведенная площадь парусности при втором водоизмещении

$$S_2 = S_1 - \Delta S_2. \quad (776)$$

Ордината центра парусности при втором водоизмещении относительно соответствующей ему ватерлинии:

$$Z_2 = \frac{S_1 Z_1 - \Delta S_2 Z_{\Delta s_2}}{S_2} - (T_2 - T_1). \quad (777)$$

Приведенный момент площади парусности

$$m_2 = S_2 Z_2. \quad (778)$$

При рассмотрении статического действия ветра, например при определении статического крена судна, величины приведенной площади парусности и момента ее множатся на среднее значение давления шкалы Бофорта. Пользование данными Морского Регистра СССР

Таблица 99

Расчет приведенной площади парусности и моментов

№ п/п.	Наименование участков площади парусности	Площадь S_i, $м^2$	Коэффициент заполнения f_i, —	Коэффициент обтекания k_i, —	Приведенная площадь III · IV · V $S_i \cdot f_i \cdot k_i$, $м^2$	Возвышение ЦТ площади над ватерлинией $Z_i - T$, $м$	Приведенный момент площади VI · VII, $м^2$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Надводный борт						
2	Бак						
3							
	Суммы				$\sum_1 = S_1$	$Z_{s_1} = \frac{m_{s_1}}{S_1}$	$\sum_2 = m_{s_1}$

(табл. 98) в таких случаях недопустимо. При рассмотрении динамического действия ветра следует брать либо давление при шквале по шкале Бофорта, либо данные Морского Регистра СССР (табл. 98).

При статическом действии силы давления ветра корабль дрейфует с некоторой скоростью, вследствие чего на подводную поверхность его действует сила сопротивления воды, равная по величине силе давления ветра. Точку приложения равнодействующей силы сопроти-

вления дрейфу принято считать на уровне середины осадки (рис. 124). В результате на судно действует кренящая пара, плечо которой равно:

$$C = Z_s - \frac{T}{2}. \qquad (779)$$

Величина кренящего момента при статическом действии ветра

$$M_{\text{ст}} = P_{\text{ст}}\left(Z_s - \frac{T}{2}\right), \qquad (780)$$

где $P_{\text{ст}}$ — сила давления ветра при статическом его действии.

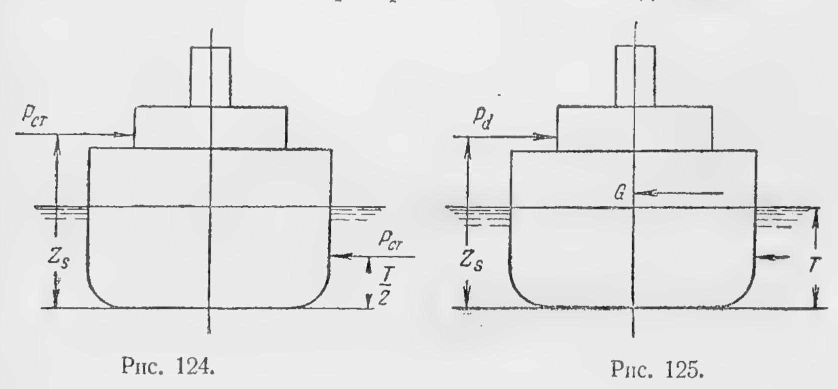


Рис. 124. Рис. 125.

При крене корабля как сила давления ветра, так и плечо кренящего момента изменяются; в иностранной практике величину кренящего момента принято определять по формуле

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{ст}} \cos\theta. \qquad (781)$$

Однако в практике советского судостроения принято считать кренящий момент не зависящим от угла крена судна, что дает некоторую погрешность, идущую в сторону увеличения действительного запаса остойчивости.

При динамическом действии шквала явление существенно усложняется. В этом случае процесс наклонения судна заканчивается обычно ранее, нежели успеет установиться постоянная скорость дрейфа, и на судно, помимо силы давления ветра и сопротивления воды дрейфу, должны действовать еще силы инерции как самого судна, так и окружающей его воды (рис. 125). В начальный момент действия шквала дрейф вовсе отсутствует и на судно действуют только силы давления ветра и силы инерции. Равнодействующая сил инерции должна проходить на высоте общего центра инерции массы судна и присоединенной массы воды. По мере увеличения скорости дрейфа силы инерции падают и возрастает сила сопротивления дрейфу так, что равнодействующая этих двух сил равна силе давления ветра, а точка приложения равнодействующей перемещается от общего центра тяжести к середине осадки. Учитывая, что центр тяжести обычно

бывает несколько выше ватерлинии и что при совершении первого наклонения точка приложения равнодействующей не успевает заметно опуститься, в отечественной практике установилось правило, в целях унификации и упрощения, условно считать плечо кренящего момента при шквале от центра парусности до плоскости ватерлинии судна в прямом его положении.

Кренящий момент при действии шквала в этом случае определяется формулой:

$$M_{\text{дин}} = P_d (Z_s - T), \tag{782}$$

где P_d — сила давления ветра при шквале;

$Z_s - T$ — высота центра парусности над ватерлинией.

При этом обычно принимается, что скорость шквала возрастает мгновенно от нуля до максимального значения и что момент при наклонении судна остается постоянным. Кроме того, этот способ расчета подразумевает, что продолжительность порыва ветра при максимальной силе его достаточна лишь для первого наклонения судна и что ко времени второго наклонения судна в сторону действия ветра сила его ослабевает.

Характер изменения кренящего момента от мгновенного действия шквала с течением времени может быть приближенно определен по формуле С. Н. Благовещенского:

$$M_{\text{кр}} = pS_0 \left(Z_s - \frac{Z_{g_1}}{\operatorname{ch}^2 \alpha t} - \frac{T}{2} \operatorname{th}^2 \alpha t \right), \tag{783}$$

где p — мгновенно приложенное расчетное давление ветра;

S_0 — приведенная площадь парусности;

t — время;

Z_s — возвышение центра парусности над основной;

Z_{g_1} — возвышение над основной общего центра инерции массы судна и присоединенной массы воды;

α — величина, определяемая выражением:

$$\alpha = g \frac{\sqrt{kS_0pF}}{D + \Delta D}; \tag{784}$$

здесь D — вес судна;

$\frac{\Delta D}{g}$ — присоединенная масса воды;

F — площадь силуэта подводной поверхности судна;

k — коэффициент сопротивления воды боковому дрейфу судна в формуле:

$$R = kFv^2, \tag{785}$$

где R — сила сопротивления дрейфу;

v — скорость дрейфа.

Величина k может быть принята равной

$$k = C_y \frac{\gamma}{2g},$$

где C_y — безразмерный коэффициент сопротивления дрейфу, равный приблизительно $C_y = 1{,}0 \div 1{,}2$; γ — объемный вес воды; g — ускорение силы тяжести.

Ордината Z_{g_1} может быть определена по приближенной формуле:

$$Z_{g_1} \cong \frac{DZ_g + \Delta D \frac{T}{2}}{D + \Delta D}. \qquad (786)$$

Формула С. Н. Благовещенского не учитывает влияния на величину кренящего момента продолжительности нарастания скорости шквала и наклонения судна.

§ 84. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО УГЛОВ КРЕНА КОРАБЛЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕТРА

Угол статического крена корабля может быть определен по диаграмме статической остойчивости из соотношения

$$l_{кр} = l,$$

где l — плечо статической остойчивости;

$l_{кр}$ — приведенное плечо статической кренящей пары от действия ветра, определяемое формулой:

$$l_{кр} = \frac{1}{D} P_{ст} S_0 \left(Z_s - \frac{T}{2} \right), \qquad (787)$$

где $P_{ст}$ — среднее давление ветра, соответствующее расчетной силе ветра в баллах по шкале Бофорта (табл. 95), прочие обозначения те же, что в § 83.

Определение статического крена производится путем графического построения, описанного в § 43 (рис. 58).

Условное предельное давление ветра, выдерживаемое судном при статическом действии ветра, может быть определено из соотношения:

$$l_{кр} = l_{max},$$

где l_{max} — максимальное плечо статической остойчивости.

Величина условного предельного давления равна:

$$P_{ст.\,пред} = \frac{Dl_{max}}{m_s - S_0 \frac{T}{2}}, \qquad (788)$$

где величины S_0 и m_s определяются по формулам (766) и (768) по схеме табл. 97.

По вычисленному $P_{ст.\,пред}$ определяется с помощью табл. 95 условная предельная сила ветра в баллах по шкале Бофорта при статическом его действии. Основная условность установления предельной силы ветра в баллах по этому способу состоит в том, что он совер-

шенно не учитывает влияния боковой качки от действия волн, которые практически всегда возникают в морских условиях при ветре.

Простейший способ определения динамического угла крена корабля при действии шквала, применяемый в стандартных расчетах, основан на применении диаграммы динамической остойчивости.

Вычисляется приведенное плечо постоянной кренящей пары:

$$l_{кр} = \frac{1}{D} P_d S_0 (Z_s - T),$$

где P_d — давление ветра при шквале по данным табл. 95 или 98;

S_0 — приведенная площадь парусности, вычисляемая по схеме табл. 97 или 99;

$Z_s - T$ — возвышение центра парусности над ватерлинией.

Определение динамического угла крена производится с помощью графического построения, описанного в § 43 (рис. 64).

Для определения условного предельного давления ветра, выдерживаемого судном при внезапном приложении шквала, следует найти путем проведения из начала координат касательной к диаграмме динамической остойчивости (§ 43, рис. 65) величину предельного выдерживаемого опрокидывающего момента $M_{пр}$ или плеча его $l_{пр}$.

Величина условного предельного давления определится по формуле:

$$P_{d_{пр}} = \frac{D l_{пр}}{m_s - S_0 T}, \tag{789}$$

где величины S_0 и m_s вычисляются по формулам (766) и (768) по схеме табл. 97.

По найденному таким способом предельному давлению при шквале находится по табл. 95 соответствующая условная предельная сила ветра в баллах. Основная условность определения указанным способом силы ветра в баллах состоит в том, что этот способ игнорирует влияние боковой качки, что он предполагает постоянство во времени плеча кренящего момента при шквале и не учитывает изменения момента от наклонения судна.

§ 85. УТОЧНЕННЫЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОГО КРЕНА ОТ ДЕЙСТВИЯ ШКВАЛА

Методика более точного расчета динамических углов крена при шквале не вполне установлена и разные авторы предлагают для этой цели различные способы, основанные на разных допущениях.

Расчет динамического угла крена по способу проф. Г. Е. Павленко основан на интегрировании двух уравнений движения судна при шквале.

Уравнение поступательного движения при дрейфе

$$M_1 \dot{v} = P - kv^2. \tag{790}$$

Уравнение вращательного движения

$$A_1 \ddot{\theta} = P l_1 + k v^2 l_2 - F(\theta). \tag{791}$$

где M_1 — масса судна с учетом присоединенной массы воды;

v — скорость дрейфа;

P — сила давления ветра при шквале;

k — коэффициент пропорциональности в выражении для силы сопротивления дрейфу;

A_1 — момент инерции массы судна с учетом присоединенной массы воды;

l_1 и l_2 — координаты центра парусности и центра сопротивления воды дрейфу (рис. 126), причем за начало координат принят общий центр инерции g_1 массы судна и присоединенной массы воды. Возвышение начала координат над основной плоскостью может быть определено по формуле (786);

$F(\theta)$ — момент статической остойчивости судна, задаваемый диаграммой.

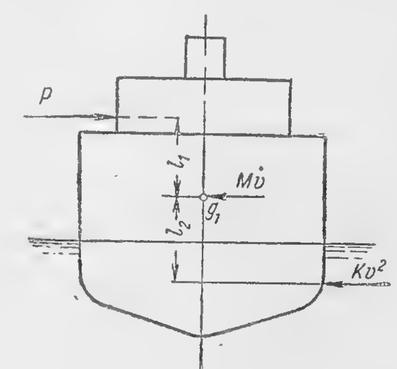


Рис. 126.

Динамический угол крена определится по диаграмме динамической остойчивости, как абсцисса θ_0 точки пересечения кривой динамической остойчивости $\Phi(\theta)$ с кривой, уравнение которой имеет вид:

$$f(\theta) = Pl_1\theta + Pl_2\int_0^\theta \psi(\theta)\,d\theta, \tag{792}$$

где

$$\psi(\theta) = \text{th}^2\left(\frac{\sqrt{PK}}{M}\varphi(\theta)\right), \tag{793}$$

$$\varphi(\theta) = \sqrt{\frac{A_1}{2}}\int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{PZ_x\theta - \Phi(\theta)}} = t, \tag{794}$$

где

$$Z_x = l_1 + \varepsilon l_2. \tag{795}$$

Здесь

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{th}\,\frac{k\pi}{n}}{\frac{k\pi}{n}}, \tag{796}$$

где n — частота боковой качки на тихой воде при малых амплитудах

$$n = \sqrt{\frac{D(r-a)}{A_1}} = \frac{2\pi}{T}. \tag{797}$$

Расчет начинается с вычисления величины Z_x и функции $\varphi(\theta)$. При малых θ до 5° можно пренебречь в выражении (794) величиной $\Phi(\theta)$ по сравнению с $PZ_x\theta$:

$$\varphi(\theta)_{\theta=5^\circ} = \sqrt{\frac{A_1}{2}} \int_0^{0,0875} \frac{d\theta}{\sqrt{PZ_x\theta}} = \sqrt{\frac{0,175\,A_1}{PZ_x}}, \qquad (798)$$

где 0,0875 — величина угла 5° в радианах.

При значении $\theta = 10^\circ$ величина $\varphi(\theta)$ может быть вычислена по формуле:

$$\varphi(\theta)_{\theta=10^\circ} = \sqrt{\frac{0,175\,A_1}{PZ_x}} + \sqrt{\frac{A_1}{2}} \cdot \frac{0,0875}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{0,0875PZ_x - \Phi(0,0875)}} + \frac{1}{\sqrt{0,175\,PZ_x - \Phi(0,175)}}\right]. \qquad (799)$$

Дальнейший расчет $\varphi(\theta)$ производится по схеме, приведенной в табл. 100.

Далее, в табл. 101 производится расчет функции $\psi(\theta)$ и $f(\theta)$.

Построив на диаграмме динамической остойчивости кривую, следует найти точку пересечения ее с диаграммой. Абсцисса точки пересечения дает искомый динамический крен.

Таблица 100

Расчет вспомогательной функции $\varphi(\theta)$ к определению крена от действия шквала

$\theta°$	θ радианы	$PZ_x\theta$	$\Phi(\theta)$	III—IV	$\sqrt{V}$	$\frac{1}{VI}$	Интегральная сумма $\sum VII$	$0,0875 \cdot \sqrt{\frac{A_1}{2}} VIII$	$\varphi(\theta) = \varphi(10°) + IX$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
10°						←	0	0	$\varphi(10°)$
20°						↓ → ←	Σ_{20}	σ_{20}	$\varphi(20°) = \varphi(10°) + \sigma_{20}$
30°						↓ →	Σ_{30}	σ_{30}	$\varphi(30°) = \varphi(10°) + \sigma_{30}$
:									

Вычисление присоединенной массы воды при дрейфе проф. Г. Е. Павленко рекомендует производить по формуле:

$$\Delta M = 0{,}475 \frac{\gamma}{g} T^2 L. \tag{800}$$

Коэффициент сопротивления дрейфу может быть принят равным

$$k = C_x \frac{\gamma}{2g} F, \tag{801}$$

где F — площадь погруженной части диаметральной плоскости;

C_x — приблизительно равен $1{,}0 \div 1{,}2$.

Величина момента инерции массы судна может быть определена по формулам § 2 раздела „Качка корабля" настоящего Справочника.

Таблица 101

Расчет вспомогательных функций к определению крена от действия шквала

I	$\theta°$	0	10°	20°	30°
II	$\varphi(\theta)$				
III	$\frac{\sqrt{Pk}}{M}\varphi(\theta)$				
IV	th III				
V	$\text{th}^2\,\text{III} = \text{IV}^2$				
VI	Интегральная $\sum$ V				
VII	$0{,}0875\,pl_2$ VI				
VIII	$Pl_1\theta$				
IX	$f(\theta) = \text{VII} + \text{VIII}$				

Способ Г. Е. Павленко предполагает мгновенное приложение максимальной силы шквала и постоянство скорости его в течение промежутка времени, достаточного для первого наклонения судна на борт, после чего предполагается, что скорость порыва ветра ослабевает. Способ не учитывает влияния сил сопротивления боковой качке и влияния наклонения судна на величину кренящего момента от шквала.

Расчет динамического крена корабля от действия шквала по способу Г. А. Фирсова предполагает, что давление шквала нарастает от нуля до заданной величины P_0 в течение τ секунд, после чего оно остается постоянным и равным P_0 в течение неопределенно долгого времени. Нарастание давления предполагается линейным во времени, так что эпюра изменения давления шквала имеет вид, пред-

ставленный на рис. 127. Далее предполагается, что диаграмма остойчивости корабля линейна и что корабль расположен лагом к ветру. Влияние волн и наклонения судна на величину кренящего момента не учитывается.

Величина динамического угла крена при шквале определяется выражением:

$$0=\frac{P_0 l_1}{D\,(r-a)}\left[1-\frac{T}{\pi\tau}e^{-h\,(t-\tau)}\sin\frac{\pi\tau}{T}\cos\frac{\pi}{T}(2t-\tau)\right]+$$

$$+\frac{P_0 l_2}{D\,(r-a)}\left(1-\varphi_1 e^{-\frac{k}{m}t}\right), \qquad (802)$$

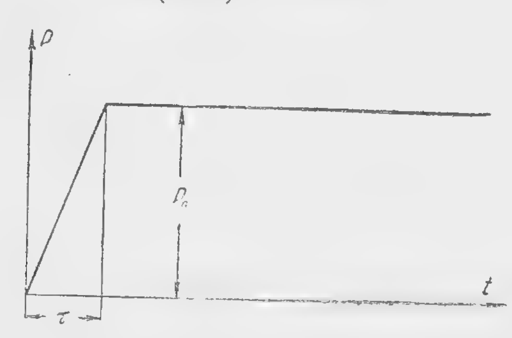


Рис. 127.

где P_0 — полная сила давления ветра;

l_1 — возвышение центра парусности над центром тяжести G корабля;

D — водоизмещение судна;

$(r-a)$ — метацентрическая высота;

A_1 — момент инерции массы судна с учетом присоединенной массы воды;

l_2 — возвышение центра тяжести судна над центром бокового сопротивления дрейфу;

$2h$ — коэффициент сопротивления боковой качке;

T — период качки на тихой воде:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{A_1}{D\,(r-a)}};$$

k — коэффициент сопротивления дрейфу;

m — масса корабля с учетом присоединенной массы воды

$$\varphi_1=\frac{m}{k}\,\frac{e^{\frac{k}{m}\tau}-1}{\tau}. \qquad (803)$$

В более общем случае, когда диаграмма статической остойчивости не линейна, выполнение расчета должно быть произведено в следующем порядке:

1) по формуле

$$M_0 = P_0 l_2 (1 - \varphi_1 e^{-\frac{k}{m} nT}) \tag{804}$$

вычисляется статически действующий кренящий момент M_0; с помощью диаграммы статической остойчивости последовательно определяются углы статического наклонения θ_1 корабля под действием момента M_0 для 1, 2, 3, ... n-го размаха корабля под ветер;

2) по формуле

$$q = 1 - \frac{T}{\pi\tau} e^{-h(nT - \tau)} \sin \frac{\pi\tau}{T} \tag{805}$$

подсчитывается величина q для 1, 2, 3... размаха корабля под ветер

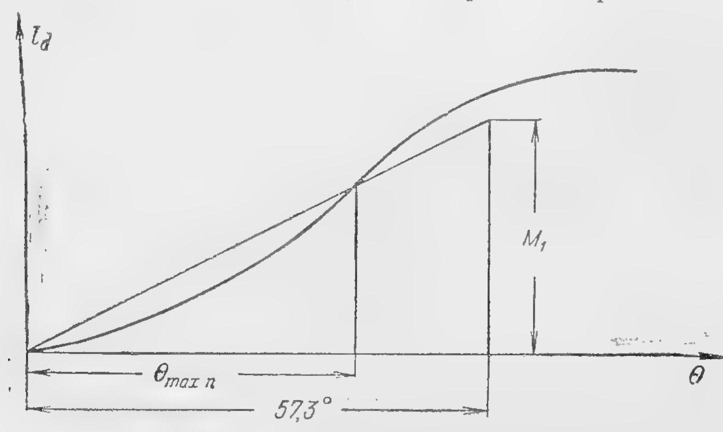


Рис. 128.

3) по формуле

$$M_1 = \frac{q}{2} P_0 l_1 \tag{806}$$

вычисляется величина приведенной динамически действующей кренящей пары M_1 для 1, 2, 3, ... n-го размаха;

4) по диаграмме динамической остойчивости с помощью построений, указанных на рис. 128, для каждого из n представляющих интерес размахов определяется наибольший угол крена θ_2 корабля под ветер от действия приведенного момента M_1;

5) в результате расчета, произведенного согласно п.п. 1 и 4, строится диаграмма суммарных углов крена $\theta_d = \theta_1 + \theta_2$ корабля от вертикали в зависимости от числа полных размахов n или от времени, выражаемого в периодах бортовой качки T (рис. 129).

Для определения коэффициента сопротивления дрейфу следует пользоваться формулой:

$$k = \sqrt{Q} \text{ th } \left(\frac{\sqrt{Q}}{m} nT\right), \tag{807}$$

где

$$Q = C_x \frac{\gamma}{2g} F P_0. \tag{808}$$

Коэффициент C_x может быть принят равным $1{,}0 \div 1{,}2$; F — погруженная площадь диаметральной плоскости.

Величину коэффициента сопротивления воды бортовой качке следует принимать равной: $2h = (0{,}07 \div 0{,}10)\,\frac{2\pi}{T}$, если корабль не снабжен

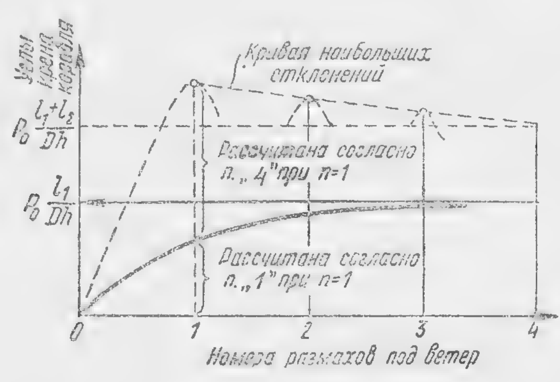


Рис. 129.

скуловыми килями; $2h = (0{,}11 \div 0{,}14)\,\frac{2\pi}{T}$, если корабль имеет нормальные скуловые кили. Большие цифры относятся к килеватым обводам, меньшие — к более круглым.

§ 86. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО КРЕНА КОРАБЛЯ ОТ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ШКВАЛА И ВОЛН

Излагаемая ниже схема приближенного расчета динамического крена корабля при совместном действии шквала и волн разработана С. Н. Благовещенским. При расчете по этой схеме предполагается, что корабль испытывает боковую качку на волнении в условиях резонанса, причем амплитуда качки в относительных координатах равна φ_m. Способы определения амплитуды φ_m подробно изложены в § 5 и 10 раздела „Качка корабля" настоящего Справочника. В момент наибольшего относительного наклонения φ_m в сторону наветренного борта на корабль действует порыв ветра. Кренящий момент, создаваемый действием порыва, возрастает по линейному закону от нуля до максимального значения в течение t_1 секунд и затем остается постоянным в течение промежутка времени, достаточного для одного наклонения судна на подветренный борт, после чего порыв ветра и создаваемый им кренящий момент ослабевают. Эпюра кренящего момента показана на рис. 130.

Расчет кренящего момента от действия шквала может быть выполнен в соответствии с указаниями § 83, причем давление ветра должно

быть взято по табл. 95 для шквала рассматриваемой силы. Плечо кренящего момента от действия шквала рекомендуется принимать равным возвышению центра парусности над ватерлинией.

Диференциальное уравнение крена корабля на рассматриваемом участке движения может быть написано в виде:

$$A_1\ddot{\varphi} + 2N\dot{\varphi} + Dl(\varphi) = A\sigma^2\alpha_m \cos(\sigma t + \gamma) + M(t), \qquad (809)$$

где φ — угол относительного крена корабля, измеряемый между диаметральной плоскостью корабля и нормалью к волне;

$\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ — его производные по времени;

A_1 — момент инерции массы корабля относительно центральной продольной оси с учетом присоединенной массы воды;

A — тот же момент инерции, но без учета присоединенной массы воды;

$2N$ — коэффициент сопротивления качке;

$l(\varphi)$ — плечо статической остойчивости корабля при крене $\theta = \varphi$;

α_m — угол наибольшего действующего склона волны;

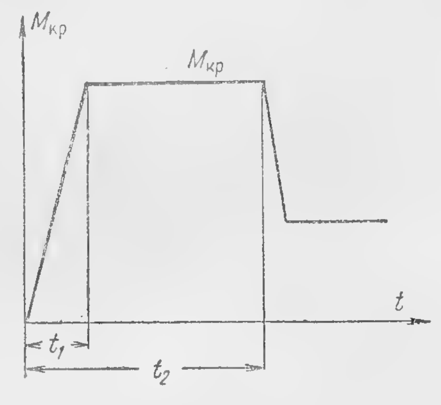


Рис. 130.

σ — частота волны, принимаемая равной собственной частоте боковой качки корабля на тихой воде с амплитудой $\varphi_m = \theta_m$;

γ — угол отставания по фазе качания корабля от возмущающей силы, принимаемый в рассматриваемом случае $\gamma = 90°$;

$M(t)$ — кренящий момент от действия шквала.

На основании закона сохранения энергии можно приравнять изменение живой силы качки корабля сумме работ всех моментов, действующих на корабль:

$$A_1\left(\frac{\dot{\varphi}_1^2}{2} - \frac{\dot{\varphi}_0^2}{2}\right) = \sum R. \qquad (810)$$

Так как при достижении кораблем наибольшего наклонения φ_1 (динамического крена) на подветренный борт живая сила обращается в нуль, то следует приравнять нулю сумму работ:

$$\sum R_i = A\sigma^2\alpha_m \int\limits_{-\varphi_m}^{\varphi_1} \sin\sigma t\, d\varphi + \int\limits_{-\varphi_m}^{\varphi_1} M(t)\, d\varphi - 2N \times$$

$$\times \int\limits_{-\varphi_m}^{\varphi_1} \dot{\varphi}\, d\varphi - D \int\limits_{-\varphi_m}^{\varphi_1} l(\varphi)\, d\varphi = 0. \qquad (811)$$

Изменение угла наклонения φ от времени аппроксимируется формулой:

при значении $0 < t < \frac{T_m}{4}$

$$\varphi = -\varphi_m \cos n_m t. \tag{812}$$

при значении $\frac{T_m}{4} < t < \frac{T_1}{2}$

$$\varphi = \varphi_1 \sin n_1 \left(t - \frac{T_m}{4}\right), \tag{813}$$

где φ_m — начальное отклонение корабля на подветренный борт;

φ_1 — неизвестный искомый динамический крен;

$n_m = \frac{2\pi}{T_m}$ — частота боковой качки на тихой воде при амплитуде $\theta = \varphi_m$;

$n_1 = \frac{2\pi}{T_1}$ — та же частота при амплитуде φ_1.

Расчет основывается на вычислении каждого из интегралов, входящих в уравнение работ (811) с учетом (812) и (813), и получении отсюда уравнения для определения искомого угла крена. Расчет может быть выполнен по уточненной и упрощенной схеме.

При расчете по уточненной схеме следует воспользоваться выражением (814), представляющим окончательный результат вычисления интегралов.

$$l_d(\varphi_1) = l_d(\varphi_m) + \varkappa l_{кр}(\varphi_m + \varphi_1) + \frac{\pi}{4} k(r - a)\alpha_m \nu_m^2 \varphi_1 \left(1 - \frac{\nu_1 \varphi_1}{\nu_m \varphi_m}\right). \tag{814}$$

Здесь $l_d(\varphi_1)$ и $l_d(\varphi_m)$ — ординаты диаграммы динамической остойчивости корабля в масштабе плеч при углах крена $\theta = \varphi_1$ и $\theta = \varphi_m$;

$\varkappa$ — функция, определяемая по табл. 102 в зависимости от отношения

$$y_1 = \frac{2t_1}{T_m} \text{ и } \frac{\varphi_1}{\varphi_m},$$

где t_1 — продолжительность нарастания кренящего момента;

T_m — период боковой качки судна на тихой воде с амплитудой $\theta = \varphi_m$;

$l_{кр} = \frac{M_0}{D}$ — приведенное кренящее плечо от действия полного кренящего момента от шквала;

$k = \frac{A}{A_1}$ определяется по материалам § 2 раздела „Качка корабля“ настоящего Справочника;

α_m — эффективный угол волнового склона; определяется по данным § 4 и 6 раздела „Качка корабля“;

$\nu_m = \frac{n_m}{n_0}$ — отношение частоты качки на тихой воде с амплитудой $\theta = \varphi_m$ к частоте боковой качки при малой амплитуде;

$\nu_1 = \frac{n_1}{n_0}$ — то же отношение при амплитуде $\theta = \varphi_1$.

Вычислению должно предшествовать определение резонансной амплитуды φ_m и построение вспомогательного графика функций

$$\nu = \frac{n}{n_0} = \frac{T_0}{T} = f(\varphi) \text{ и } \nu\varphi = f_1(\varphi).$$

Графики эти рекомендуется строить на диаграмме динамической остойчивости, полагая $\theta = \varphi$. Вычисление значений ν может быть произведено по способу Г. Е. Павленко, описанному в § 9 раздела „Качка корабля“ настоящего Справочника.

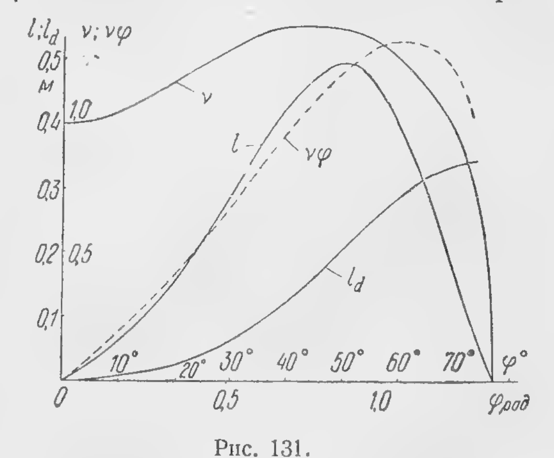


Рис. 131.

Вид графика показан на рис. 131. Данные значений функции $\varkappa$ приводятся в табл. 102.

Близость к единице значений функции $\varkappa$ свидетельствует о незначительном влиянии конечной продолжительности t_1 нарастания шквала на величину динамического крена. При расчетах величину t_1 можно принимать $t_1 = 1-2$ сек.

Решение уравнения (814) для определения угла крена производится способом последовательных приближений. Первоначально следует задаться величиной $\varphi_1' > \varphi_m$ и, определив по графикам рис. 131 величины ν_1' и $\nu_1'\varphi_1'$, рассчитать правую часть уравнения (814). Далее, по вычисленной величине l_{d_1} следует определить соответствующий ей угол наклонения φ_1''. Если угол φ_1'' близок к принятому вначале значению φ_1', то можно положить $\varphi_1 = \varphi_1''$ и прекратить вычисления. Если же они значительно отличаются, то следует вторично вычислить правую часть уравнения (814), приняв в ней $\varphi_1 = \varphi_1''$, и по диаграмме динамической остойчивости определить угол φ_1''', который и принять равным искомому φ_1.

Если вычисленная по правой части уравнения (814) ордината динамической остойчивости будет превышать $0{,}9 l_{d_{\max}}$, где $l_{d_{\max}}$ — максимальная ордината динамической остойчивости, то это будет свидетельствовать об опрокидывании судна, либо о большой близости к опрокидыванию. Опрокидывание будет иметь место, если при последующем приближении l_d превысит $l_{d_{\max}}$.

При вычислении полезно учитывать, что последний член уравнения (814) практически бывает всегда отрицателен, так как физически он представляет избыток работы сил сопротивления качки над работой

возмущающей силы от действия волн. При стабильной резонансной амплитуде качки эти работы равны друг другу, так как сообщаемая кораблю волнами энергия поглощается работой сил сопротивления. При нарушении шквалом стабильности режима качки в сторону увеличения размахов, равенство работ перестает иметь место и отрицательная работа сил сопротивления обычно больше положительной работы возмущающей силы.

Описанный метод решения задачи допускает возможность принятия других предположений относительно характера изменения кренящего

Таблица 102

Значение вспомогательной функции

$\frac{\varphi_1}{\varphi_m}$	$y_1 = \frac{2t_1}{T_m}$					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
	$\varkappa$					
1,0	1,00	—	—	—	—	—
1,1	1,00	0,99	0,97	0,93	0,88	0,83
1,2	1,00	0,99	0,97	0,94	0,89	0,84
1,3	1,00	0,99	0,97	0,94	0,89	0,84
1,4	1,00	0,99	0,97	0,94	0,90	0,85
1,5	1,00	0,99	0,97	0,94	0,90	0,85
1,6	1,00	0,99	0,97	0,94	0,90	0,86
1,7	1,00	0,99	0,97	0,95	0,91	0,86
1,8	1,00	0,99	0,97	0,95	0,91	0,87
1,9	1,00	0,99	0,98	0,95	0,91	0,87
2,0	1,00	0,99	0,98	0,95	0,92	0,88

момента от шквала и зависимости момента сил сопротивления качке от угловой ее скорости. Но в этом случае должен быть соответствующим образом изменен вид уравнения (814).

Упрощенная схема расчета получается, если принять допущение о мгновенном нарастании силы шквала и пренебречь избытком работы силы сопротивления. Оба допущения, очевидно, ведут к ошибке в сторону некоторого завышения определяемого динамического угла крена. Согласно первому допущению следует принять $\varkappa = 1,00$, и уравнение для определения динамического крена принимает вид:

$$l_d(\varphi_1) = l_d(\varphi_m) + l_{\text{кр}}(\varphi_m + \varphi_1). \tag{815}$$

Уравнение (815) может быть решено путем простого построения на диаграмме динамической остойчивости, причем может быть принято $\varphi = 0$.

Для определения динамического угла крена диаграмма динамической остойчивости продолжается в области отрицательных абсцисс

на участке, равном амплитуде качки (рис. 132). Влево от начала координат откладывается амплитуда качки φ_m и на диаграмме фиксируется соответствующая точка A. Из точки A проводится прямая линия параллельно оси абсцисс, на которой откладывается отрезок AB, равный одному радиану (57,3°). Из точки B восстанавливается перпендикуляр, на котором откладывается отрезок $BC = l_{кр}$. Абсцисса

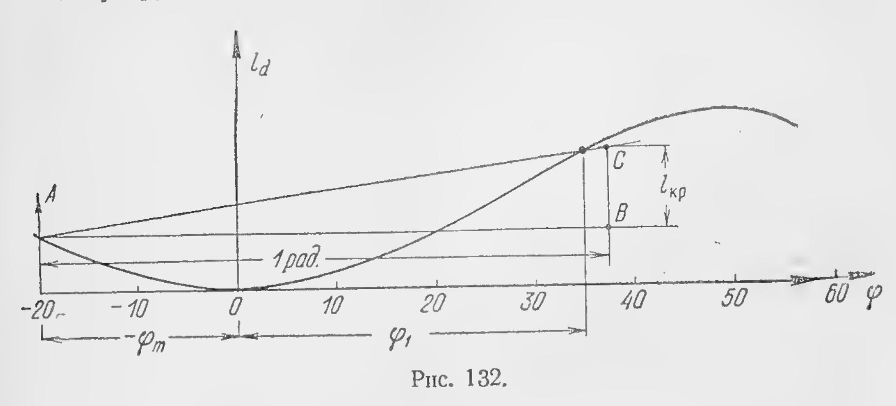


Рис. 132.

точки пересечения наклонной прямой AC с правой ветвью диаграммы динамической остойчивости определяет искомый угол динамического крена. Описанное построение было независимо от автора настоящего Справочника предложено также проф. Г. Е. Павленко.

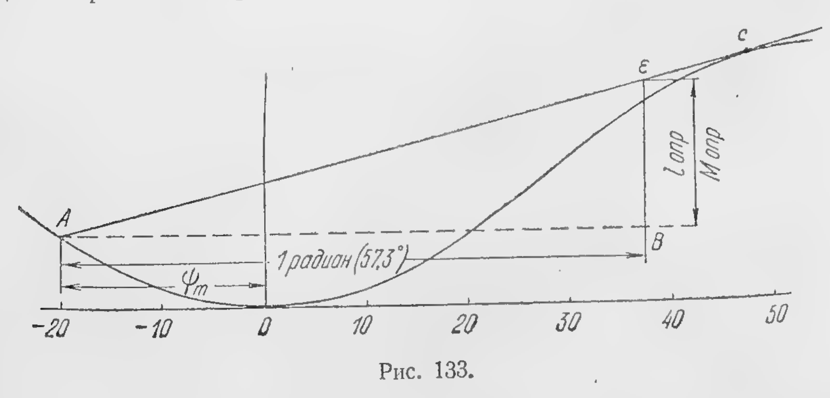


Рис. 133.

Аналогичное построение может быть применено для определения динамического опрокидывающего момента с учетом качки. Для этого на продолженной в области отрицательных абсцисс диаграмме динамической остойчивости влево от начала координат откладывается амплитуда качки и на диаграмме фиксируется соответствующая точка A (рис. 133). Из точки A проводится касательная к правой ветви диаграммы динамической остойчивости и прямая, параллельная оси абсцисс, на которой откладывается отрезок AB, равный одному радиану. Из

точки B восстанавливается вверх перпендикуляр до пересечения с касательной к диаграмме в точке ε. Отрезок $B\varepsilon$ равен плечу предельного (опрокидывающего) динамического момента, если диаграмма построена в масштабе плеч, или предельному моменту, если она построена в масштабе моментов. Зная величину предельного момента, можно по формуле (789) определить величину условного предельного давления ветра и соответствующую ей силу ветра в баллах по табл. 95 с учетом качки. Определение этим способом предельной выдерживаемой силы ветра и динамического угла крена содержит значительно меньший элемент условности, нежели при расчете по формулам § 84 без учета качки.

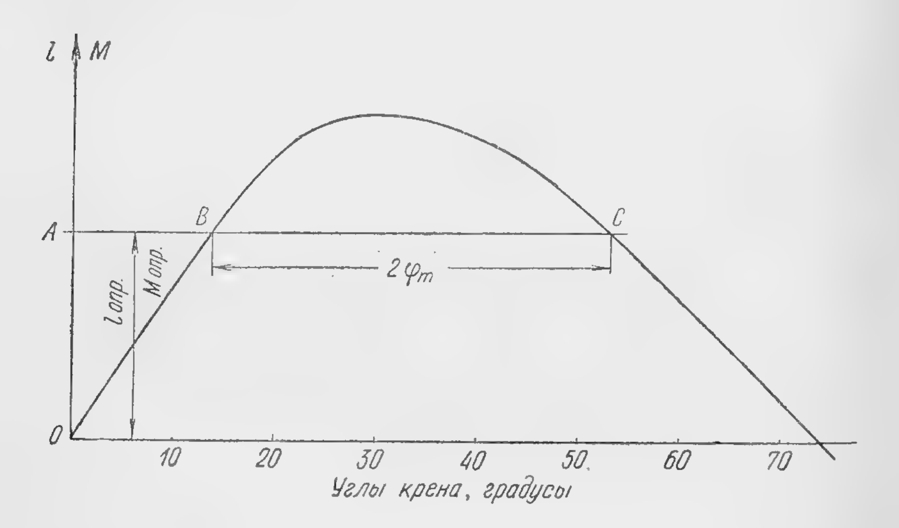


Рис. 134.

Задача установления с учетом качки предельной статически действующей силы ветра пока не получила математического разрешения. Для весьма приближенного решения ее может быть применено следующее построение, предложенное С. Н. Благовещенским.

Для определения опрокидывающего статического момента (рис. 134) на диаграмме статической остойчивости проводится прямая линия ABC, параллельная оси абсцисс, таким образом, чтобы отрезок BC, заключенный между точками пересечения прямой с обеими ветвями диаграммы, был равен двойной амплитуде качки $2\varphi_m$ без учета ветра.

Отрезок OA, равный расстоянию между осью абсцисс и линией ABC, условно принимается равным плечу $l_{\text{опр}}$ статически действующего предельного (или опрокидывающего) момента с учетом качки, если диаграмма остойчивости построена в масштабе плеч, или моменту, если она построена в масштабе моментов.

Предельное давление ветра в этом случае может быть определено по формуле (788) и с помощью табл. 95 по данным столбца, содержащего среднюю величину давления ветра, может быть определена предельная сила его в баллах.

§ 87. РАСЧЕТ КРЕНА КОРАБЛЯ НА ЦИРКУЛЯЦИИ

Приводимые ниже формулы пригодны для определения статического крена корабля в условиях установившейся циркуляции и учитывают главным образом влияние центробежной силы инерции. Крен может быть также вызван действием гидромеханических факторов, как то: давления воды на руль, несимметричности распределения гидродинамического давления воды на днище корабля и т. п., причем в некоторых случаях динамический крен, возникающий в эволюционный период циркуляции, может достичь значительной величины. Однако метод расчета крена корабля от перечисленных факторов мало разработан, и потому в практических расчетах приходится ограничиваться определением крена в условиях установившейся циркуляции корабля.

В тех случаях, когда известны скорость хода корабля на установившейся циркуляции и диаметр ее, кренящий момент может быть определен по формуле:

$$M_{кр} = \frac{D}{g}\frac{v^2}{R}\left(Z_g - \frac{T}{2}\right) + P\left(Z_p - \frac{T}{2}\right), \qquad (816)$$

где v — скорость хода (*м*/сек.) корабля на установившейся циркуляции;

R — радиус установившейся циркуляции;

$\frac{D}{g}$ — масса корабля;

Z_g — возвышение ЦТ корабля над основной;

T — осадка;

P — сила давления воды на руль;

Z_p — возвышение точки приложения силы P над основной.

Обычно второй член в формуле (816) бывает мал по сравнению с первым и потому его можно не учитывать.

Скорость хода корабля на установившейся циркуляции может быть определена либо по данным испытаний судов прототипов, либо по эмпирической формуле, предложенной Г. А. Фирсовым:

$$v = v_0 \operatorname{th}\frac{R}{2{,}45\,L}, \qquad (817)$$

где v_0 — скорость хода (*м*/сек.) на прямом курсе корабля при выходе его на циркуляцию;

L — длина корабля по грузовой ватерлинии.

Наибольший кренящий момент от действия центробежной силы на установившейся циркуляции при наименее благоприятных соотноше-

ниях между элементами циркуляции и корабля может быть определен по формуле Г. А. Фирсова:

$$M_{кр} = 0{,}233 \frac{D}{g} \frac{v_0^2}{L} \left(Z_g - \frac{T}{2} \right). \qquad (818)$$

Статический крен может быть определен либо с помощью диаграммы статической остойчивости, либо по формуле, предложенной Г. А. Фирсовым:

$$\theta^\circ = 1{,}4 \frac{v_0^2}{(r-a)L} \left(Z_g - \frac{T}{2} \right). \qquad (819)$$

Формула (819) предполагает возможность применения метацентрической формулы остойчивости для определения статического угла крена.

§ 88. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ И ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОСТОЙЧИВОСТЬ

Кренящие моменты от перемещения грузов могут возникнуть вследствие разных причин, зависящих от типа и конструкции судна, рода грузов и условий эксплоатации. Так, например, у судов, перевозящих руду или зерно, перемещение может создаться вследствие пересыпания грузов на борт, если угол крена судна при качке превысит угол естественного откоса грузов. У лесовозных судов кренящий момент может появиться вследствие несимметричного намокания палубного груза во время рейса. Кренящие моменты будут также иметь место при несимметричном приеме и расходовании груза, топлива, балласта и т. п.

Получающиеся при этом кренящие моменты должны каждый раз определяться применительно к данным типам судов и конкретным условиям эксплоатации по общим формулам, приведенным в § 25 и 41.

При рассмотрении остойчивости пассажирских судов приходится определять кренящие моменты от скопления пассажиров на одном борту.

Предполагается, что пассажиры скопляются на верхних доступных для них палубах, располагаясь от фальшборта до диаметральной плоскости судна. По правилам Морского Регистра СССР, плотность размещения толпы людей следует принимать 6 человек на каждом квадратном метре площади палубы и центр тяжести стоящих людей на высоте 1,1 *м* над уровнем палубы. Следует отметить, что последнее рекомендуется не вполне обоснованно, так как свободно стоящий на палубе человек будет сохранять при крене корабля вертикальное положение. Поэтому центр тяжести человека точнее было бы принимать на уровне палубы, подобно тому, как центр тяжести подвешенного груза условно принимается в точке подвеса.

Вес одного взрослого пассажира следует принимать равным 75 *кг*, вес двух детей моложе 12 лет равным весу одного взрослого пассажира.

Для ориентировочных расчетов величину кренящего момента от скопления пассажиров на одном борту можно определять по приближенной формуле:

$$M_{кр} = \frac{PB}{4}, \quad (820)$$

где P — общий вес располагающихся на палубах пассажиров;

B — ширина судна.

При расчете остойчивости судов арктического плавания надлежит учитывать влияние обледенения на водоизмещение и на положение ЦТ судна.

В качестве ориентировочных норм обледенения Морской Регистр рекомендует принимать:

1) количество льда на каждый квадратный метр площади открытых палуб — 30 *кг*;

2) количество льда на каждый погонный метр длины стрел, вант, штагов и иных снастей, а также леeров и леерных стоек — 5 *кг*;

3) предельную высоту распространения обледенения от уровня действующей ватерлинии в прямом положении судна — 10 *м*.

§ 89. ОСТОЙЧИВОСТЬ БУКСИРНЫХ СУДОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ОТ НАТЯЖЕНИЯ И РЫВКА БУКСИРНОГО ТРОСА

При ходе озерного или речного буксира с возом кренящее усилие, возникающее от натяжения буксирного троса, появляется при отклонении троса от диаметральной плоскости. По исследованию П. О. Зандина, максимальное усилие будет при отклонении троса на 45° и может быть принято равным

$$P_m = 0{,}015\,HP \sin 45° \cos 45° = 0{,}0075\,HP_m, \quad (821)$$

где HP — индикаторная мощность буксира и коэффициент 0,015 — тяговое усилие на одну индикаторную силу, принимаемое П. О. Зандиным равным 15 *кг*. Кренящий момент, создаваемый тросом, равен

$$M = P_m\left(Z_f - \frac{T}{2}\right), \quad (822)$$

где Z_f — возвышение буксирного гака над основной;

$\frac{T}{2}$ — возвышение над основной центра бокового сопротивления воды дрейфу, принимаемое на уровне середины осадки.

Угол крена буксира равен

$$\theta_c = \frac{P_m\left(Z_f - \frac{T}{2}\right)}{D\,(r - a)}, \quad (823)$$

где D — водоизмещение буксира;

$r - a$ — его метацентрическая высота.

Более сложным является вопрос о кренящих усилиях и динамическом крене буксиров при рывке буксирного троса. Методика расчета остойчивости буксиров при рывке троса не вполне разработана, и предлагаемые различными авторами способы расчета содержат элемент условности.

По материалам А. К. Осмоловского, при поверке достаточности остойчивости морских буксиров кренящий момент при рывке следует определять по формуле:

$$M_{кр} = klP, \qquad (824)$$

где P — тяговое усилие, m;

l — возвышение буксирного гака над центром тяжести буксира;

k — числовой коэффициент, величина которого, по данным Осмоловского, должна составлять $k = 4 — 5$ с повышением для буксиров малых размеров.

Тяговое усилие при пользовании этой формулой рекомендуется принимать 10 *кг* на одну индикаторную лошадиную силу.

Определяемый по формуле (824) кренящий момент должен быть менее предельного (опрокидывающего) момента, получаемого путем построения касательной к диаграмме динамической остойчивости из начала координат (§ 43, рис. 65).

Рекомендация А. К. Осмоловского основывается на статистической обработке опыта эксплоатации ряда буксиров.

По временным нормам Морского Регистра СССР 1947 г., буксирные суда должны выдерживать динамически приложенный кренящий момент, определяемый формулой (824), где k — числовой коэффициент, принимаемый для буксиров мощностью 200 и менее индикаторных сил равным 5, а для буксиров мощностью от 500 индикаторных сил и выше равным 4. Для промежуточных мощностей коэффициент k определяется интерполяцией.

Значение усилия P определяется при скорости буксировки 5 узлов и во всяком случае должно составлять величину не менее чем 0,010 HP, где HP — паспортная индикаторная мощность.

Остойчивость буксирных судов с развитыми надстройками должна быть также проверена на совместное действие рывка и ветровой нагрузки, определяемой по схеме табл. 99 на основании данных табл. 98. В этом случае в формуле для рывка коэффициент k принимается в зависимости от района плавания равным от 1,5 до 2,5.

Г. В. Ефремов предлагает определять кренящий момент на действие рывка буксирного троса по формуле:

$$M_{кр} = kP(Z_f - Z_g)\sin\varphi, \qquad (825)$$

где k — коэффициент запаса прочности буксирного троса на разрыв, изменяющийся в пределах $6 < k < 10$. Рекомендуется принимать $k = 8$;

P — нормальное тяговое усилие буксира.

В расчетах можно принимать $P = 0{,}012\ HP$, где HP — индикаторная мощность буксира;

Z_f — возвышение буксирного гака над основной;

φ — угол, составляемый буксирным тросом с диаметральной плоскостью. Рекомендуется принимать $\varphi = 20°$.

После подстановки рекомендуемых значений расчетная формула (825) принимает вид:

$$M_{кр} = 0{,}033\,HP\,(Z_f - Z_g). \tag{826}$$

Способ проф. Г. Е. Павленко позволяет более полно учесть динамику рывка буксирного троса. В основу этого способа принято допущение о весьма большой массе буксируемого судна по сравнению с массой буксирующего. Предполагается также, что буксирный трос не получает удлинения при натяжении, что масса его пренебрежимо мала и что точка крепления буксирного гака находится на одной вертикали с центром тяжести буксира. Сила сопротивления

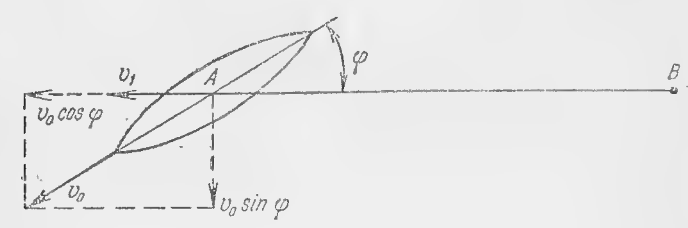


Рис. 135.

боковой качке буксира не учитывается. Все перечисленные допущения ужесточают условия расчета и ведут к некоторому завышению расчетного динамического угла крена.

Предполагается далее, что буксир выбирает слабину троса, идя со скоростью v_0, причем в момент рывка направление троса AB составляет угол φ с диаметральной плоскостью буксира (рис. 135). В момент, предшествующий рывку, живая сила буксира равна $\frac{M^{I} v_0^2}{2}$, где M^{I} — масса буксира с учетом присоединенной массы воды. После рывка точка A крепления буксирного гака может иметь лишь перпендикулярную к линии AB составляющую скорость.

Центр тяжести судна, располагаясь ниже точки A на величину $(Z_f - Z_g)$, продолжает двигаться вдоль линии AB с некоторой скоростью v_1, вызывая тем самым изменение крена и дифферента буксира. Часть живой силы судна, идущая на образование крена судна, должна быть поглощена работой восстанавливающей пары. Угол динамического крена судна определяется как абсцисса точки пересечения некоторой суммарной функции $T(\theta) + \phi(\theta)$ с прямой $a\theta + c$, т. е. как графическое решение уравнения (рис. 136).

$$T(\theta) + \phi(\theta) = a\theta + c. \tag{827}$$

Практический ход расчета сводится к выполнению следующих операций.

Вычисляется присоединенная масса воды для продольного и поперечного перемещений судна.

Для продольного перемещения

$$\Delta M_1 = 0{,}475 \frac{\gamma}{g} T^2 B. \tag{828}$$

Для поперечного перемещения (дрейфа)

$$\Delta M_2 = 0{,}475 \frac{\gamma}{g} T^2 L, \tag{829}$$

где γ — объемный вес воды;
T — осадка;
B — ширина судна;
L — длина судна;
g — ускорение силы тяжести.

По вычисленным ΔM_1 и ΔM_2 строится эллипс присоединенных масс воды с полуосями $\frac{1}{\sqrt{\Delta M_1}}$ и $\frac{1}{\sqrt{\Delta M_2}}$.

Для перемещения вдоль буксирного троса, составляющего заданный угол φ с диаметральной плоскостью, вычисляется полная масса по формуле:

$$M_\varphi = M_0 + \Delta M_\varphi, \tag{830}$$

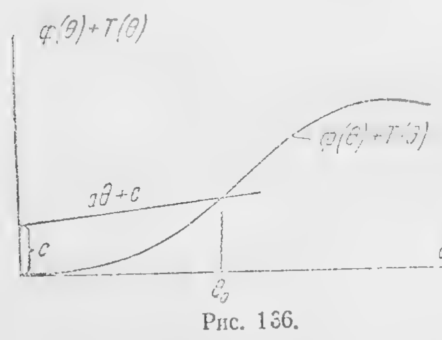


Рис. 136.

где $M_0 = \frac{D}{g}$ — масса буксира; ΔM_φ — присоединенная масса воды, определяемая по вектору $\frac{1}{\sqrt{\Delta M_\varphi}}$ эллипса масс, составляющему угол φ с диаметральной плоскостью $\left(\text{вектором } \frac{1}{\sqrt{\Delta M_1}}\right)$.

Вычисляется (условная) масса для перемещения судна вдоль диаметральной плоскости:

$$M^{\mathrm{I}} = M_0 + \Delta M_1. \tag{831}$$

Вычисляется условная масса судна по перемещению вдоль троса BA:

$$M_1 = M^{\mathrm{I}} + (M^{\mathrm{I}} - M_\varphi) \operatorname{tg}^2\varphi. \tag{832}$$

Вычисляется постоянная, представляющая приближенно ту часть живой силы судна после рывка, которая должна быть поглощена работой восстанавливающей пары:

$$C = \frac{A_2 v_0^2}{2} \frac{M_1}{I_1 + A_2 \operatorname{tg}^2\varphi} \sin^2\varphi, \tag{833}$$

где I_1 — момент инерции массы судна относительно горизонтальной центральной поперечной оси с учетом присоединенной массы воды;

A_2 — момент инерции массы судна относительно продольной оси, проходящей через точку закрепления буксирного гака:

$$A_2 = A_1 + M (Z_f - Z_g)^2. \quad (834)$$

Здесь

A_1 — момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси;

M — масса судна с учетом присоединенной массы воды.

Постоянная a определится по формуле:

$$a = C_n \frac{\gamma}{2g} F\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)\left(Z_f - \frac{T}{2}\right) v_0^2 \sin^2 \varphi, \quad (835)$$

где C_n — безразмерный коэффициент, равный $C_n \approx 0{,}500$;

F — погруженная площадь диаметральной плоскости.

Вычисляется постоянная b по формуле:

$$b = C_n \frac{\gamma}{2g} F (Z_f - Z_g)\left(Z_f - \frac{T}{2}\right) v_0. \quad (836)$$

Вычисляется функция для ряда значений θ:

$$\dot{\theta} = \sqrt{\frac{2}{A_2}} \sqrt{a\theta - \mathscr{D}(\theta) + C} = \chi(\theta), \quad (837)$$

где $\mathscr{D}(\theta)$ — динамическая остойчивость судна:

$$\mathscr{D}(\theta) = Dl_d.$$

По схеме интегрирования с верхним переменным пределом вычисляется функция:

$$T(\theta) = b \int_0^\theta \chi(\theta)\, d\theta. \quad (838)$$

Строится диаграмма суммарной функции в зависимости от угла крена (рис. 136):

$$\overline{Y}_1 = \mathscr{D}(\theta) + T(\theta). \quad (839)$$

На диаграмме суммарной функции строится прямая по уравнению:

$$\overline{Y}_2 = a\theta + C. \quad (840)$$

Абсцисса точки пересечения суммарной функции и прямой равна искомому динамическому углу крена. На рис. 136 показано построение для определения динамического угла крена при заданном значении угла φ.

§ 90. РАСЧЕТ КРЕНА КОРАБЛЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ АРТИЛЛЕРИИ

Крен корабля при залповой стрельбе из орудий и возникающая при ряде последовательных залпов качка могут достигать таких величин, при которых правильная стрельба из орудий станет затруднительной. Наибольшей величины крен будет достигать при стрельбе по траверзу с нулевым углом возвышения. Действие орудийного выстрела на корабль равносильно приложению к кораблю кренящего мо-

мента M в течение короткого времени τ, равного продолжительности отката орудия, причем величина кренящего момента равна произведению из силы отдачи орудия на возвышение его оси $Z - Z_g$ над центром тяжести судна, т. е.

$$M = P(Z - Z_g). \tag{841}$$

В случае залповой стрельбы

$$M = \sum P_i (Z_i - Z_g). \tag{842}$$

Величина угла крена при стрельбе может быть определена по формулам проф. Ю. А. Шиманского, выведенным в предположении, что углы крена находятся в пределах применяемости метацентрической формулы остойчивости и что влияние образующегося при залпе дрейфа судна пренебрежимо мало.

Если стрельба производится на тихой воде с неподвижного корабля, так что начальная угловая скорость и крен корабля перед выстрелом равны нулю, то угол крена при одиночном залпе может быть определен по формуле:

$$\theta_1^\circ = 57{,}3 \frac{ks\tau}{n_1} e^{-h\frac{T}{2}}. \tag{843}$$

Наибольший угол крена в результате большого количества последовательных залпов через одинаковые промежутки времени, равные m периодам качки судна (mT):

$$\theta_{\max}^\circ = \theta_1^\circ \frac{1}{1 - e^{-hmT}}. \tag{844}$$

Угол крена после производства k залпов

$$\theta_k^\circ = \theta_1^\circ \frac{e^{-hmkT} - 1}{e^{-hmT} - 1}, \tag{845}$$

где

$$s = \frac{P \sum l_i}{A_1}. \tag{846}$$

Здесь P — сила отдачи орудия при выстреле;

$\sum l_i$ — сумма возвышений осей орудий над центром тяжести судна ($l_i = Z_i - Z_g$);

A_1 — момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси.

Если известен период качки судна на тихой воде, то момент инерции может быть определен по выражению:

$$A_1 \approx \frac{D(r - a)T^2}{4\pi^2}, \tag{847}$$

в противном случае величину A_1 следует определить в соответствии с указаниями § 2 раздела „Качка корабля“ настоящего Справочника.

τ — продолжительность действия силы отдачи;

T — период качки на тихой воде:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A_1}{D(r-a)}};$$

n_1 — частота качки на тихой воде; $n_1 = \frac{2\pi}{T}$;

m — число периодов качки судна между залпами;

h — величина, характеризующая сопротивление воды качке судна, вычисляется по данным опыта с подходящим по типу судном, либо по указаниям § 3 раздела „Качка корабля" настоящего Справочника;

k — поправочный коэффициент, учитывающий неточность выведенных для угла крена формул и неточности, допущенные при определении численных значений входящих в них величин. Коэффициент k может быть вычислен по данным опыта стрельб с подходящего по типу судна.

Величина силы, действующей при выстреле, может быть определена по формуле:

$$p = \frac{(Q + kW)^2}{2gbG} v_0^2, \qquad (848)$$

где Q — вес снаряда;

W — вес заряда;

k — коэффициент пороха;

v_0 — начальная скорость вылета снаряда;

b — длина отката;

G — вес откатной системы;

g — земное ускорение.

§ 91. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОСТОЙЧИВОСТИ

Для того чтобы капитан корабля имел ясное представление о характеристиках остойчивости вверенного ему судна, он должен располагать надлежащим образом составленными информационными данными об остойчивости. Форма и содержание этих данных, называемых обычно информацией для капитана, не вполне определились, и на практике встречаются разные способы составления информации.

В гражданском судостроении наиболее часто встречается способ информации путем составления таблицы данных, относящихся к некоторым характерным случаям нагрузки корабля. Из многочисленных, возможных при эксплоатации корабля вариантов нагрузки выбираются те, которые либо чаще всего встречаются в условиях службы корабля, либо неблагоприятны с точки зрения остойчивости. На рис. 137 приведены в качестве примера информационные данные об остойчивости рыболовного траулера. В табл. 103 приведена схема расчета дифферента и начальной остойчивости этого траулера для разных случаев нагрузки. Расчет диаграммы статической остойчивости выполняется по схемам, приведенным в § 36.

Таблица 103

Расчет диферента и начальной остойчивости при различных вариантах нагрузки

№ п. п.	Элементы пловучести и остойчивости	Единица измерения	Обозначения и формулы	Варианты		
				1	2	3
I	Водоизмещение весовое	m	D	1107	1107	687
II	Водоизмещение объемное теоретическое	$м^3$	$V = \frac{D}{\gamma}$	1073	1073	666
III	Осадка средняя теоретическая	$м$	$T_{ср}$	4,09	4,09	2,95
IV	Абсцисса ЦТ (от миделя)	»	X_g	—0,90	+0,92	—2,11
V	Абсцисса ЦВ (от миделя)	»	X_c	—0,74	—0,74	—0,82
VI	Отстояние ЦТ от ЦВ	»	$X_g - X_c$	—0,16	+1,66	—1,29
VII	Возвышение ЦТ над основной линией	»	Z_g	3,50	3,63	3,91
VIII	Продольная МЦ высота	»	$H = (R + Z_c) - Z_g$	49,5	49,4	59,4
IX	Диферент	»	$\Delta T = (X_g - X_c)\frac{L}{H}$	—0,16	+1,65	—1,06
X	Абсцисса ЦТ ВЛ (от миделя)	»	X_f	—1,03	—1,03	—0,35
XI	Изменение осадки носом	»	$\delta T_н = \left(\frac{L}{2} - X_f\right)\frac{\Delta T}{L}$	—0,08	+0,86	—0,54
XII	Изменение осадки кормой	»	$\delta T_к = -\left(\frac{L}{2} + X_f\right)\cdot\frac{\Delta T}{L}$	+0,08	—0,79	+0,52
XIII	Осадка носом теоретическая	»	$T_н = T_{ср} - 0.5 + \delta T_н$	3,51	4,45	1,91
XIV	Осадка кормой	»	$T_к = T_{ср} + 0,5 + \delta T_к$	4,67	3,8	3,97
XV	Момент диферентующий на 1 $см$	$\frac{тм}{см}$	$\mathfrak{M}_0 = \frac{DH}{100L}$	11,2	11,1	8,3
XVI	Момент инерции площади свободной поверхности жидкости	$м^4$	$\sum \gamma_i i_i$	239	249	—

Варианты нагрузки			Статьи нагрузки: Команда	Судовые запасы, т	Топливо, т	Груз, т	Балласт, т	Водоизмещение / Дедвейт / Чист. грузопод., т
Вариант 1	Судно с полными запасами без груза	Начало рейса	40 чел. 4 т	Провизия и запасы — 10 Питьевая вода — 38 Соль — 60 Сети — 14 Питательная вода — 55	Основная яма прав. борта — 82 Основная яма лев. борта — 75 Запасная яма прав. борта — 31 Запасная яма левого борта — 31 Запасная яма — 20			1107 / 420 / 0
Вариант 2	Судно в полном грузу без запасов	Конец рейса	40 чел. 4 т	Провизия и запасы — 5 Пятьевая вода — 3 Сети — 14 Питательная вода — 20	Основная яма прав. борта — 15 Основная яма левого борта — 15	Основной рыбный трюм — 230 Запасный рыбный трюм — 60 Трюм рыбной муки правого борта — 20 Трюм рыбной муки левого борта — 20 Систерна для жира правого борта — 7 Систерна для жира левого борта — 7		1107 / 420 / 334
Вариант 3	Судно порожнем							687 / 0 / 0

Варианты нагрузки	Поперечная остойчивость: Началь. метацентр. высота испр./неиспр., м	—— I Кривая плеч статической остойчивости; - - - - II —·— моментов	Дифферент: Осадка, м ($T_к$ кормой, $T_н$ носом, $T_{ср}$ средняя)	Дифферент, м (+ носом, − кормой)	груз / топливо / судовые запасы	Момент дифферента на 1 см в т·м
Вариант 1	0,78 / 0,92	$h_0 = 0,92$ м	$T_к$ 3,695 $T_н$ 4,850 $T_{ср}$ 4,275	−0,76		11,8
Вариант 2	0,57 / 0,73	$h_0 = 0,73$ м	$T_к$ 4,633 $T_н$ 3,985 $T_{ср}$ 4,275	+1,65		11,1
Вариант 3	0,60 / 0,65	$h_0 = 0,60$	$T_н$ 2,095 $T_к$ 4,155 $T_{ср}$ 3,125	−1,06		8,3

В графе начальной метацентрической высоты верхняя цифра дает метацентрическую высоту с учетом жидких грузов, нижняя — без учета.

Рис. 137.

Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

должен располагать достаточным количеством незаполненных бланков для возможности проведения им самостоятельных расчетов. Образец незаполненного бланка показан на рис. 139.

	кости	$м^4$	$\sum \gamma_i l_i$	239	249	—

№ п/п.	Элементы пловучести и остойчивости	Единица измерения	Обозначения и формулы	Варианты		
				1	2	3
XVII	Поправки на свободную поверхность жидкости	*м*	$\Delta r = \frac{1}{D}\sum \gamma_i i_i$	0,22	0,22	—
XVIII	Возвышение поперечного МЦ над ОЛ	„	$r + Z_c$	4,42	4,42	4,51
XIX	Неисправленная поперечная МЦ высота	„	$h = (r + Z_c) - Z_g$	0,92	0,79	0,60
XX	Исправленная поперечная МЦ высота	„	$h - \Delta r$	0,70	0,57	0,60
XXI	Момент, кренящий на 1°	*тм*	$M_0 = \frac{D(h - \Delta r)}{57{,}3}$	13,6	11,0	7,2

Примечание. В строках XIII и XIV при определении $T_н$ и $T_к$ учтен конструктивный диферент на корму, равный 1 *м*.

Информационные данные, составленные по схеме рис. 137, могут отличаться друг от друга в деталях. Например, они могут содержать также диаграмму динамической остойчивости. Полезно, если на диаграммах остойчивости указан угол входа палубы в воду. Описанный способ оформления информационных данных весьма распространен также в иностранной литературе.

Основным недостатком этого типа информационных данных является затруднительность, а иногда и невозможность применения их при хотя и возникающих иногда в условиях службы, но не типичных случаях нагрузки.

В целях устранения этого недостатка Морским Регистром СССР была разработана другая форма информационных данных, составленная таким образом, чтобы капитан мог сам произвести несложные расчеты для интересующего его варианта нагрузки.

Информационные данные об остойчивости, разработанные Морским Регистром СССР, состоят из пяти таблиц, расположенных на трех типовых бланках, и чертежа диаграмм статической остойчивости. Первые четыре таблицы вместе с эскизом загрузки расположены на общем типовом бланке и служат для определения остойчивости при одном случае нагрузки. Некоторое количество таких бланков должно быть заполнено проектантом или заводом-строителем для нескольких характерных случаев нагрузки. Пример заполненного бланка для пассажирского судна показан на рис. 138. Кроме того, капитан должен располагать достаточным количеством незаполненных бланков для возможности проведения им самостоятельных расчетов. Образец незаполненного бланка показан на рис. 139.

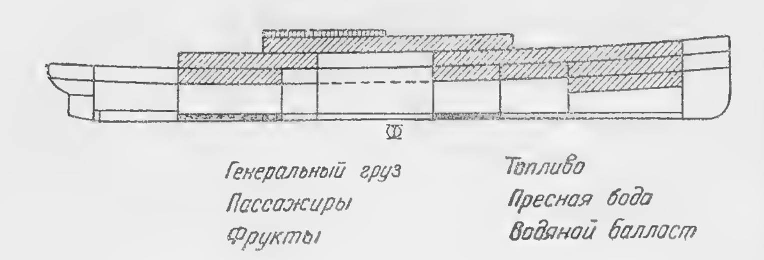


Рис. 138.

Таблица I

Статьи нагрузки	Вес, m	Возвышение ЦТ над килем, $м$	Момент относительно киля, $m\ м$
1	2	3	4
Судно порожнем	3579	5,97	21500
Пассажиры I кл. 52 чел.	8,5	12,2	104
Пассажиры II кл. на В. П. 29 чел.	4,7	10,4	49
Пассажиры II. кл. на Н. П. 169 чел.	21,6	7,8	168
Пассажиры III кл. на В. П. 60 чел.	9,8	10,0	98
Пассажиры III кл. на Н. П. 166 чел.	27,1	8,1	219
Пассажиры на платформе 46 чел.	7,5	6,0	38
Командный состав 15 чел.	2,4	14,7	35
Команда на В. П. 36 чел.	5,9	10,0	59
Команда на Н. П. 25 чел.	4,1	7,4	31
Экскурсанты	16,2	11,0	178
Фрукты	100	15,3	1530
Груз трюма № 1	—	3,9	—
Груз трюма № 2	—	3,9	—
Груз трюма № 3	—	4,3	—
Груз трюма № 4	—	4,3	—
Багаж	75	5,3	398
Почта	70	3,2	214
Вода санитарных систерн	15	20,2	303
Вода пресная на ботдеке	30	17,3	520
Вода пресная в рефрижераторе	30	3,5	105
Вода пресная в двойном дне	108	0,5	54
Провизия	12	4,23	51
Топливо и смазка	—	0,646	—
Запасы	25,2	8,6	215
Сумма	4170	—	25869

Таблица II

Остойчивость без балласта

Водоизмещение	*т*	4170
Возвышение ЦТ над килем	*м*	6,21
Возвышение метацентра над килем	„	7,08
Метацентрическая высота	„	0,87
Поправка на свободную поверхность	„	0,24
Исправленная метацентрическая высота	„	0,63
Допускаемая метацентрическая высота	„	0,73
Требуемое увеличение метацентрической высоты	„	0,10

Таблица III

Принятый балласт

Систерна, номер	Район расположения, шп.	Вес, *т*	Приращение метацентрической высоты, *м*
2	10—38	48	0,04
3	10—38	48	0,04
	Сумма	96	0,08

Таблица IV

Водоизмещение с балластом	4170 + 96 =	4266 *т*
Метацентрическая высота	0,63 + 0,08 =	0,71 *м*
Допускаемая метацентрическая высота		0,67 *м*

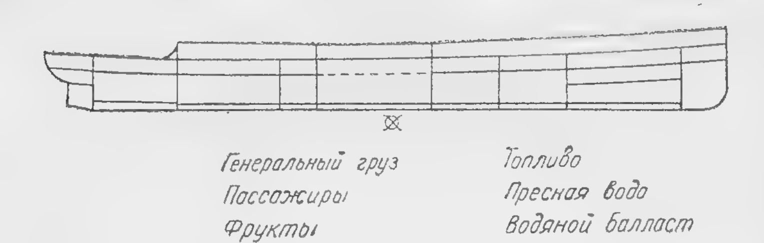


Рис. 139.

Таблица Ia

Статьи нагрузки	Вес, m	Возвышение ЦТ над килем, $м$	Момент относительно киля, $тм$
Судно порожнем	3579	5,97	21500
Пассажиры I кл. 52 чел.	—	12.2	—
Пассажиры II кл. на В. П. 29 чел.	—	10,4	—
Пассажиры II кл. на Н. П. 169 чел.	—	7,8	—
Пассажиры III кл. на В. П. 60 чел.	—	10,0	—
Пассажиры III кл. на Н. П. 166 чел.	—	8,1	—
Пассажиры на платф. 46 чел.	—	6,0	—
Командный состав 15 чел.	—	14,7	—
Команда на В. П. 36 чел.	—	10,0	—
Команда на Н. П. 25 чел.	—	7,4	—
Экскурсанты	—	11,0	—
Фрукты	—	15,3	—
Груз трюма № 1	—	3,9	—
Груз трюма № 2	—	3,9	—
Груз трюма № 3	—	4,3	—
Груз трюма № 4	—	4,3	—
Багаж	—	5,3	—
Почта	—	3,2	—
Вода санитарных систерн	—	20,2	—
Вода пресная на ботдеке	—	17,3	—
Вода пресная в рефрижераторе	—	3,5	—
Вода пресная в двойном дне	—	0,5	—
Провизия	—	4,23	—
Топливо и смазка	—	0,646	—
Запасы	—	8,6	—
Сумма			

Таблица IIa

Остойчивость без балласта

Водоизмещение	*т*	
Возвышение ЦТ над килем	*м*	
Возвышение метацентра над килем	»	
Метацентрическая высота	»	
Поправка на свободную поверхность	»	
Исправленная метацентрическая высота	»	
Допускаемая метацентрическая высота	»	
Требуемое увеличение метацентрической высоты	»	

Таблица IIIa

Принятый балласт

Систерна, номер	Район расположения, шп.	Вес, *т*	Приращение метацентрической высоты, *м*
	Сумма		

Таблица IVa

Водоизмещение с балластом		
Метацентрическая высота		
Допускаемая метацентрическая высота		

Таблица V

Водоизмещение, m	Возвышение метацентра над килем, $м$	Потеря метацентрической высоты от влияния свободной поверхности жидкости, $м$								Уменьшение поправки,[2] $м$	Критическая метацентрическая высота, $м$
		форпик 0—10 шп. 50 m	балластная цистерна 10—38 шп. 78 m	систерна пресной воды 38—54 шп. 102 m	систерна пресной воды 54—68 шп. 98 m	топливная систерна 68—98 шп.[1] 150 m	топливная систерна 98—107 шп.[1] 48 m	креновый балласт 108—132 шп.[1] 120 m	ахтерпик 141——152 шп. (пресная вода)		
4000	7,10	0,00	0,015	0,107	0,156	0,073	0,022	0,048	0,034	0,220	0,86
4100	7,09	0,00	0,014	0,104	0,151	0,072	0,022	0,047	0,033	0,160	0,78
4200	7,07	0,00	0,014	0,102	0,149	0,070	0,021	0,046	0,033	0,112	0,71
4300	7,06	0,00	0,013	0,099	0,143	0,068	0,020	0,045	0,032	0,080	0,65
4400	7,05	0,00	0,013	0,097	0,141	0,067	0,020	0,044	0,031	0,058	0,61
4500	7,03	0,00	0,013	0,095	0,139	0,065	0,020	0,043	0,031	0,040	0,58
4600	7,02	0,00	0,013	0,093	0,136	0,064	0,019	0,042	0,030	0,027	0,54
4700	7,01	0,00	0,012	0,091	0,133	0,063	0,019	0,041	0,029	0,017	0,51
4800	6,99	0,00	0,012	0,089	0,130	0,061	0,018	0,040	0,029	0,000	0,48
4900	6,98	0,00	0,012	0,087	0,128	0,060	0,018	0,039	0,028	0,000	0,46
5000	6,97	0,00	0,012	0,086	0,125	0,059	0,018	0,038	0,027	0,000	0,45
5100	6,96	0,00	0,011	0,084	0,122	0,058	0,017	0,038	0,027	0,000	0,43
5200	6,95	0,09	0,011	0,082	0,120	0,056	0,017	0,037	0,026	0,000	0,42
5300	6,94	0,00	0,011	0,081	0,118	0,055	0,017	0,036	0,026	0,000	0,40
5400	6,94	0,00	0,011	0,079	0,116	0,054	0,016	0,036	0,026	0,000	0,39
5500	6,93	0,00	0,010	0,078	0,114	0,053	0,016	0,035	0,025	0,000	0,38
5600	6,93	0,00	0,010	0,076	0,112	0,052	0,016	0,034	0,025	0,000	0,37

[1]) Потери метацентрической высоты от влияния свободных поверхностей жидкости для данных отсеков должны быть удвоены, так как они вычислены для половины отсека, разделенного непроницаемым килем.

[2]) Если уменьшение поправки больше суммарной потери метацентрической высоты, то поправка исключается вовсе.

Пятая и шестая таблицы расположены на втором и третьем бланках и содержат данные, общие для всех случаев нагрузки судна; они заполняются проектантом или заводом-строителем.

Судно в различных случаях нагрузки считается удовлетворяющим нормам остойчивости, если подсчитанная указанным ниже способом метацентрическая высота для данного водоизмещения будет выше минимально-допускаемой метацентрической высоты, приведенной в последней графе табл. V для того же водоизмещения.

Если вычисленная метацентрическая высота окажется ниже приведенной в табл. V, то это указывает на необходимость приема водяного балласта.

Расчет производится в следующем порядке.

В табл. I против наименования статей нагрузки (графа 1) проставлены значения ординат (по высоте) центра тяжести соответ-

ствующих грузов (графа 3). В случае, когда груз в трюмы принят не полностью, или когда тяжелый, но малоемкий груз занимает только нижнюю часть трюма, ординаты центра тяжести его могут быть исправлены. В графу 2 следует вписать вес (в тоннах) грузов, имеющихся в наличии при том случае нагрузки, для которого подсчитывается остойчивость. В графе 4 подсчитываются статические моменты этих грузов относительно киля, как произведения из величин графы 2 и графы 3.

В нижней строке таблицы подсчитываются суммы весов (графа 2) и моментов (графа 4).

Дальнейший расчет поперечной метацентрической высоты ведется в табл. II, где в первую строку переписывается из табл. I водоизмещение судна (в тоннах). Возвышение центра тяжести судна над килем (в метрах) для данного случая нагрузки получается как частное от деления суммы моментов на сумму весов (нижняя строка табл. 1) и записывается во вторую строку таблицы. Возвышение метацентра над килем (графа 3) для полученного водоизмещения берется из 2-й графы табл. V. Разность между величинами возвышения

Таблица VI

№ систерн	1	2	3	4	5	6	7
Район расположения, шп.	0—10	15—38	38—54	54—69 левый борт	54—69 правый борт	136—152	152—158
Вес балласта, *т*	50	70	88	48	48	84	12
Возвышение ЦТ над килем, *м*	6,20	0,75	0,70	0,65	0,65	1,50	3,80
Водоизмещение, *т*	Приращение метацентрической высоты, *м*						
4000	—0,03	0,05	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4100	—0,03	0,05	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4200	—0,03	0,05	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4300	—0,02	0,05	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4400	—0,02	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4500	—0,02	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4600	—0,02	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,00
4700	—0,02	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
4800	—0,02	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
4900	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5000	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5100	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5200	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5300	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5400	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5500	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00
5600	—0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,00

метацентра и возвышения ЦТ даст значение метацентрической высоты в метрах (графа 4), которое и будет истинным, если все систерны на судне или запрессованы, или пусты.

В том случае, когда систерны заполнены частично (т. е. имеются свободные поверхности жидкости), метацентрическая высота должна быть уменьшена на величину, указанную в табл. V. Величины поправок для разных систерн складываются, и из полученной суммы вычитается „уменьшение поправки", приведенное в предпоследней графе табл. V. Полученная разность равна поправке на потерю метацентрической высоты от влияния свободной поверхности жидкости в систернах.

Поправка записывается в 5-ю строку табл. II. В шестой строке табл. II получается исправленное значение метацентрической высоты (разность между величинами из строк 4 и 5).

Величина минимально-допускаемой метацентрической высоты (строка 7) берется из последней графы табл. V. Если исправленная метацентрическая высота больше допускаемой, расчет на этом и заканчивается, если меньше — то в последней строке таблицы подсчитывается требуемое увеличение метацентрической высоты, как разность между величинами допускаемой и полученной метацентрических высот.

Количество водяного балласта, которое необходимо принять для обеспечения требуемой остойчивости, определяется в табл. III. Оно определяется с таким расчетом, чтобы суммарное приращение метацентрической высоты (нижняя строка 4-й графы) было равно (или немного меньше) требующемуся ее увеличению (нижняя строка табл. II). Приращение метацентрической высоты при заполнении отдельной систерны приведено в табл. VI. В верхней части табл. VI приводятся номера балластных систерн и основные данные о них. В нижней части помещаются величины приращения метацентрической высоты для каждой систерны при разных значениях водоизмещения судна. Если, например, при водоизмещении судна 4500 *т* принимается балласт в систерны № 3 и 5, суммарное приращение метацентрической высоты составит $\delta h = 0{,}07 + 0{,}04 = 0{,}11$ *м*.

Наконец, в табл. IV подсчитываются: а) водоизмещение судна с принятым балластом (сумма весов, полученных в табл. I и III), б) достигнутая балластировкой метацентрическая высота (исправленная метацентрическая высота из табл. II плюс суммарное приращение метацентрической высоты из табл. III) и в) минимально-допускаемая метацентрическая высота (из табл. V для водоизмещения с балластом).

Для наглядности на эскизе наносится расположение основных грузов из приведенных в табл. I.

Для возможности суждения о характере диаграммы статической остойчивости судна приводится серия диаграмм, из которых может быть взята ближайшая по величинам водоизмещения и метацентрической высоты кривая в качестве приближенной диаграммы статической остойчивости.

При необходимости получить диаграмму статической остойчивости с большей точностью, это может быть достигнуто путем двойной

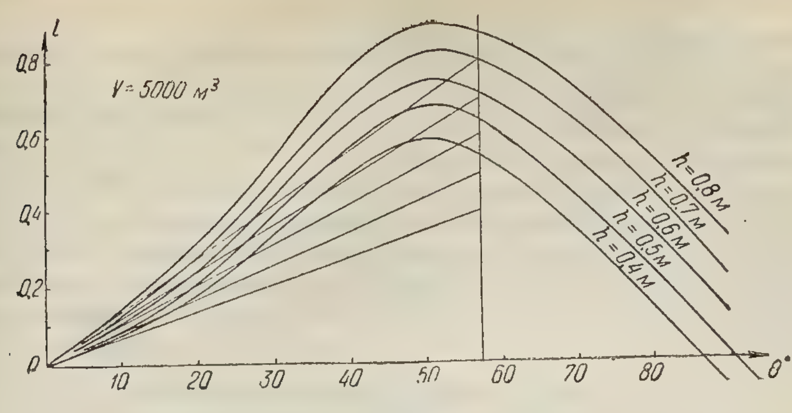


Рис. 140.

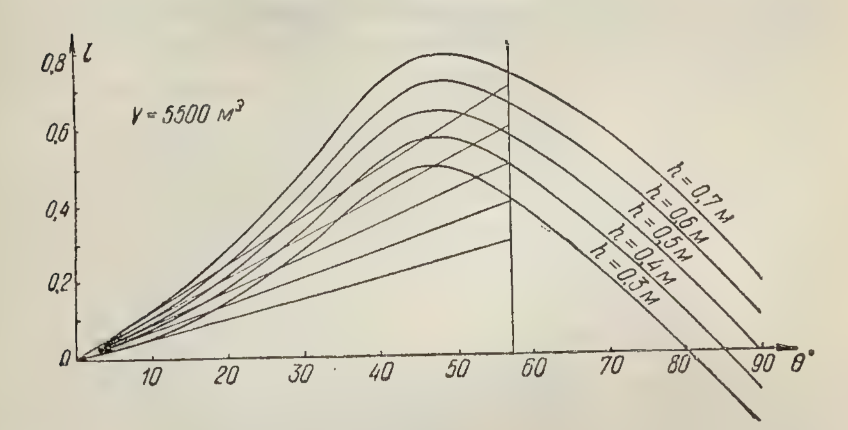


Рис. 141.

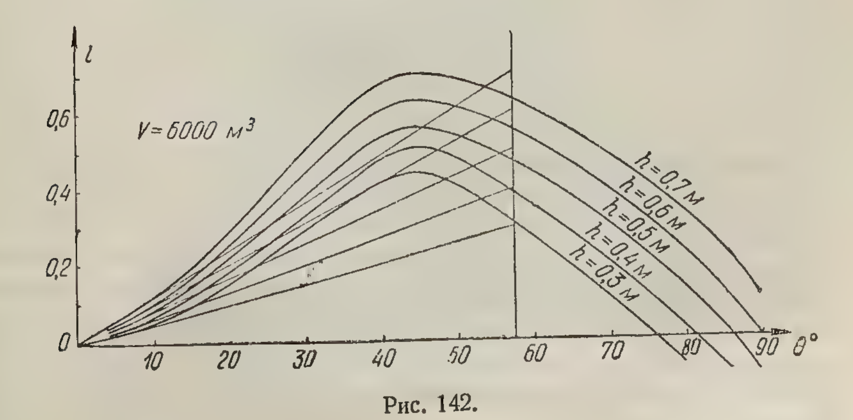


Рис. 142.

интерполяции между ближайшими кривыми той же серии (рис. 140, 141, 142).

Для составления информации необходимо располагать данными о величине минимально допустимой, критической метацентрической высоты при различных значениях водоизмещения. Способы определения критической метацентрической высоты различны для разных типов судов и устанавливаются в результате применения к ним временных норм остойчивости морских судов. Морским Регистром СССР разработана подробная инструкция для составления проектантом информационных данных об остойчивости, в которой даются необходимые указания.

§ 92. ДИАГРАММЫ ПРОФ. Г. Е. ПАВЛЕНКО

Проф. Г. Е. Павленко были предложены диаграммы, применение которых позволяет капитану путем несложных вычислений получить необходимые информационные данные об остойчивости для любых случаев нагрузки.

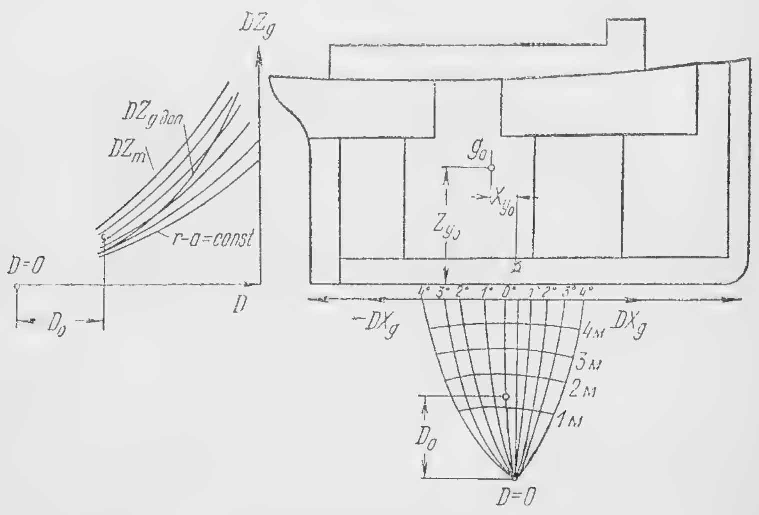


Рис. 143.

Первая диаграмма носит название векторной и предназначается для определения начальной остойчивости и посадки судна при любом состоянии и любых изменениях его нагрузки.

Диаграмма состоит из продольного разреза судна, вычерченного в удобном для пользования масштабе, и серии кривых, построенных ниже бокового разреза и слева от него.

На рис. 143 показан схематический чертеж внутреннего расположения корабля. Для удобства он построен с сокращением продольного масштаба. Для каждого помещения, могущего содержать переменные грузы, построены:

1) кривая центров объемов C, показывающая, в каком месте находится центр тяжести груза, если он равномерно размещен в части помещения, составляющей объем V, значения которого нанесены в виде отметок на кривой;

2) кривая центров тяжести площадей f горизонтальных сечений помещения, также с отметками значений заполненного объема V; она показывает, во-первых, высоту верхнего уровня груза, занимающего объем V, и, во-вторых, положение центра тяжести небольшого количества груза, дополнительно принимаемого сверх уже имеющегося и располагаемого поверх него слоем небольшой высоты.

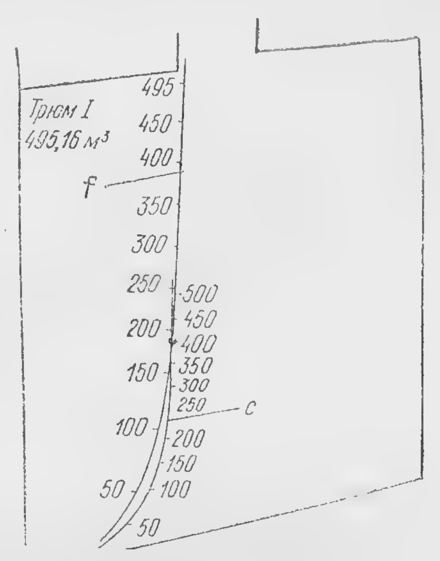


Рис. 144.

В тех помещениях, где может находиться жидкий груз со свободной поверхностью, кривые центров объема заменены кривыми метацентров; точки этих кривых представляют условные центры объемов и пользоваться ими надо так же, как кривыми центров объемов для твердых грузов.

На рис. 144 показан боковой вид носового трюма судна в искаженном масштабе с нанесенными на нем кривыми C и f.

Под чертежом судна (рис. 143) расположена ось абсцисс центров тяжести в виде прямой, параллельной основной линии, и перпендикулярная к ней ось водоизмещений с равномерно нанесенными на ней отметками значений водоизмещения, отсчитываемого снизу вверх от нуля. Здесь же нанесены два семейства кривых: а) кривых—значений углов ψ диферента и 2) кривых — значений T_m — максимальной осадки.

Расчет кривых $\psi_m = \text{const}$ и $T_m = \text{const}$ производится с помощью масштаба Бонжана по схеме, аналогичной применяемой при построении диаграммы Г. А. Фирсова и описанной в § 11. Разница заключается в том, что там за координатные оси независимых переменных принято значение осадок носом и кормой, и на диаграмме строится кривая:

$$T_к = f(T_н) \text{ при } V = \text{const} \quad \text{и} \quad T_к = f(T_н) \text{ при } X_c = \text{const},$$

здесь же, наоборот, за независимые переменные приняты значения $D = \gamma V$ и $DX_g = \gamma V X_c$, откладываемые по координатным осям, и на графике строятся кривые $DX_g = f(D)$ при $\psi = \frac{T_н - T_к}{L} = \text{const}$ и $DX_g = f(D)$ при $T_m = \text{const}$.

Под величиной T_m здесь понимается наибольшая осадка, причем $T_m = T_н$ при $\psi > 0$ и $T_m = T_к$ при $\psi < 0$.

Слева от чертежа судна также нанесены ось (вертикальная) ординат центров тяжести и ось (горизонтальная) водоизмещений. Здесь нанесено семейство кривых постоянных значений метацентрической высоты и кривая опасных нагрузок.

Семейство кривых $(r-a) = \text{const}$ строится в системе координатных осей D и DZ_g. Для построения кривых вычерчивается сначала кривая $DZ_m = f(D)$, где Z_m — возвышение метацентра над основной. Очевидно, что эта кривая соответствует значению $r-a=0$. Для построения кривой $r-a=h_1=\text{const}$ чертится кривая, ординаты которой равны $D(Z_m - h_1) = f(D)$. Подобным же образом строятся другие кривые с любыми интервалами значений $r-a$. Очевидно, что ординаты этих кривых равны величинам DZ_g, при которых значения $r-a$ постоянны. На этой же сетке чертится кривая допустимых $DZ_{g\,доп}$, названная проф. Г. Е. Павленко „кривою опасных нагрузок". Ординаты ее равны тем значениям DZ_g, при которых соблюдены принятые для рассматриваемых судов нормы остойчивости. Способ построения кривой $DZ_{g\,доп}$ в применении к временным нормам остойчивости Морского Регистра СССР может быть вполне уяснен путем ознакомления со специальной инструкцией Морского Регистра для составления информации об остойчивости.

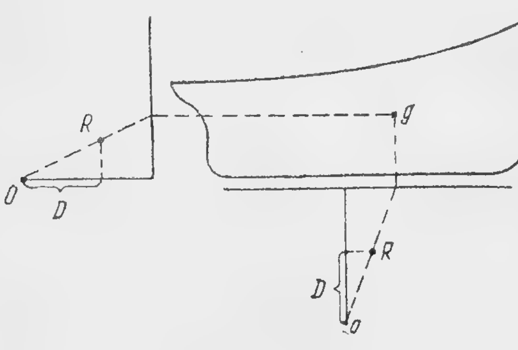


Рис. 145.

На чертеже судна показано положение центра тяжести судна g_0, соответствующее водоизмещению D_0 при полном отсутствии переменных грузов.

Пусть нужно оценить состояние корабля в предположении, что его водоизмещение равно заданной величине D и его центр тяжести помещается в точке g, изображенной на чертеже. Каким образом установлены эти данные, пока безразлично.

Каждое состояние корабля изображается точкой на нижней и на боковой диаграммах. Положение этой точки наносится следующим способом (рис. 145). На нижней диаграмме сносится точка g по вертикали на горизонтальную ось и в полученную точку оси из нулевой точки вертикальной оси проводится наклонная прямая (луч). На этом луче находится точка R, лежащая на высоте D, отсчитываемой по вертикальной оси.

Аналогичным способом на боковой диаграмме сносится точка g по горизонтали на вертикальную ось, в полученную точку оси

проводится луч из нулевой точки горизонтальной оси и на этом луче находится точка R, лежащая на вертикали, отстоящей от нулевой точки на расстоянии D.

Таким образом, расстояния D на нижней и боковой диаграммах должны быть всегда одинаковыми, чтобы точка R отображала реальное состояние судна.

Теперь можно получить оценку состояния судна.

На нижней диаграмме получается значение дифферента и наибольшей осадки по тем кривым первой и второй сетки, которые проходят через точку R.

Если точка R лежит между соседними кривыми, то принимается промежуточное значение дифферента или осадки, получаемое глазомерным делением промежутка.

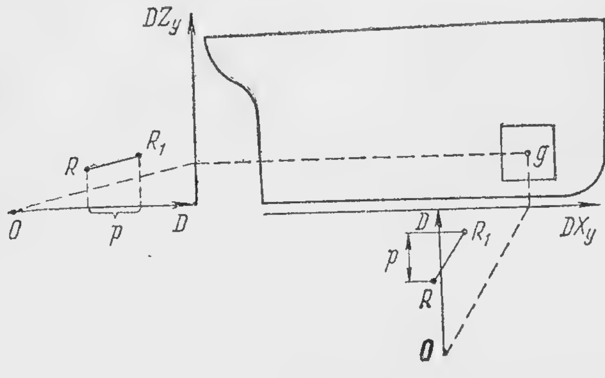


Рис. 146.

На боковой диаграмме получается значение метацентрической высоты по кривым постоянных метацентрических высот. Кроме того, если точка R лежит ниже кривой опасных нагрузок, то остойчивость судна удовлетворяет требованиям безопасности соответствующих правил Регистра или тем условиям, по которым построена эта кривая, в противном случае эти требования оказываются невыполненными.

В вышеуказанных построениях нет надобности в действительности прочерчивать лучи; достаточно делать засечки, прикладывая линейку.

Прием и снятие груза. Исходное состояние судна характеризуется точкой R (рис. 146). На судно принят груз величиной p с центром тяжести в точке g. Определить состояние судна после приема груза и произвести его оценку.

На нижней диаграмме сносится на горизонтальную ось точка g, и через полученную точку проводится луч из точки O. Параллельно лучу переносится точка R в R_1 так, чтобы по высоте она переместилась на величину P.

Аналогичным способом на боковой диаграмме сносится на вертикальную ось точка g, проводится луч из точки O и параллельно ему переносится точка R в R_1 так, чтобы расстояние по горизонтали

увеличилось на P. Полученная точка R_1 отображает новое состояние судна. Его водоизмещение отсчитывается по соответственной оси, а положение его центра тяжести получается путем проведения лучей через точки O и R_1 на обеих диаграммах до пересечения с осями центров тяжести и переноса точки пересечения по вертикали и по горизонтали до их пересечения.

Если речь идет не о принятии сосредоточенного груза, а о заполнении части трюмного пространства, то следует пользоваться кривой центров объемов данного трюма, определив первоначально объем, занимаемый грузом. Если груз принимается в виде дополнительного яруса поверх уже принятого груза, то его центр тяжести берется по кривой центров горизонтальных сечений трюма для среднего значения объема, получаемого добавлением примерно половины действительного объема принимаемого груза. Если принимается жидкий груз со свободной поверхностью, то вместо кривой центров объемов нужно пользоваться кривой метацентра, рассматривая ее условно, как кривую центров тяжести. Центр тяжести однородного груза, распределенного на палубе, следует принимать на высоте, равной половине высоты погрузки.

Если после принятия груза P принят новый груз в новом месте, то повторяется та же операция при исходном состоянии, определяемом точкой R_1, и получается новая точка R_2.

Таким образом, можно проследить весь процесс погрузки судна, который на диаграммах отобразится ломаной линией RR_1R_2. Конечная точка этой ломаной линии определяет окончательное состояние судна. Точки R_1, R_2 и т. д. отображают его промежуточные состояния.

Таким образом, можно воспроизвести заранее все этапы погрузки, проследив за всеми изменениями состояния судна до конца погрузки.

Задача о снятии груза решается аналогичным способом, с тою лишь разницей, что точка R перемещается в противоположных направлениях на обеих диаграммах.

Здесь и в дальнейшем также нет необходимости прочерчивать лучи, достаточно делать засечки по линейке. Удобнее всего пользоваться для этого обыкновенной штурманской линейкой.

Перенос груза. Перенос груза p из точки g_1 в точку g_2 (рис. 147) можно рассматривать, как последовательно выполненное снятие его и прием в другой точке.

Так как при этом водоизмещение не изменяется, то точка R_1 перейдет в новое положение, оставаясь на прямой, перпендикулярной к оси водоизмещений.

Определение состояния судна после переноса выполняется следующим способом.

Точки g_1 и g_2 сносятся на горизонтальную ось нижней диаграммы и проводятся лучи. Параллельно первому из них переносится R_1 в промежуточное положение R_1' так, чтобы высота изменилась на величину p. Параллельно второму поднимается до положения R_2 на прежней высоте.

Аналогичным способом точка R_1 переходит в новое положение R_2 на боковой диаграмме.

Исправление диферента. Пусть точка R соответствует такому состоянию судна, при котором диферент представляется недопустимым или нежелательным. Путем перемещения грузов надлежит стре-

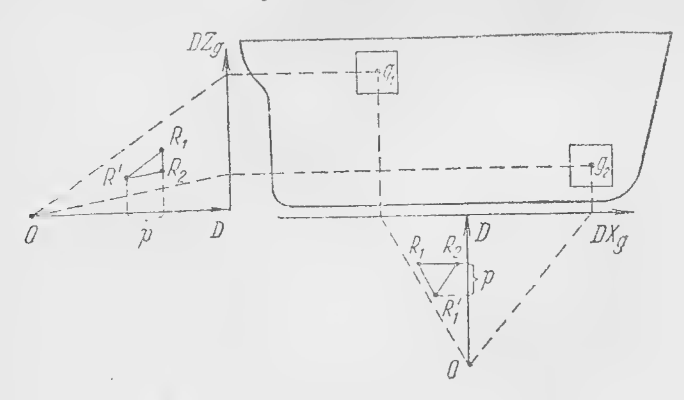


Рис. 147.

миться получить уменьшение диферента до величины, которая считается допустимой.

Точка R должна быть приведена на кривую, соответствующую этому диференту. Так как водоизмещение неизменно, то на нижней диаграмме точка R переместится в горизонтальном направлении.

На боковой диаграмме точка R либо не изменит своего положения, если перенос груза совершается по горизонтальному направлению, либо перейдет по вертикали.

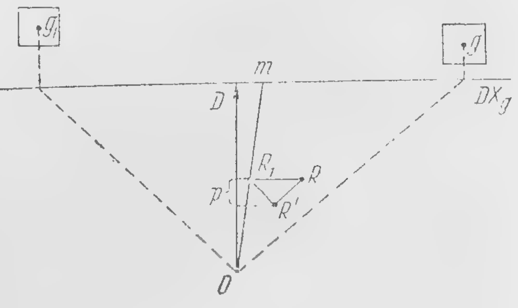


Рис. 148.

Задача может быть поставлена в такой форме. Определить количество груза, которое надо перенести из заданного места в другое заданное место, чтобы получить требуемое уменьшение диферента. Решение ее состоит в следующем.

Пусть исходное положение определяется точкой R на нижней диаграмме и Om — кривая допускаемого диферента (рис. 148), на которую должна перейти точка R. Требуемое положение точки R_1, таким образом, определено.

Груз можно переносить из g в g_1. Проводятся лучи для g и g_1. Из точек R и R_1 проводятся параллельные им прямые до пересече-

ния в точке R'. Разница в высоте положения точки R (или R_1) и R' дает количество груза, которое необходимо перенести.

Задача может быть поставлена и в другой форме. Определить расстояние, на которое надо передвинуть заданный груз P из точки g по горизонтальному направлению, чтобы получить требуемое уменьшение диферента (рис. 149). Для g проводится луч Om и параллельно ему перемещается точка R в R' так, чтобы она опустилась на высоту p. Соединяются R' с R_1 и из точки O проводится луч On, параллельный $R'R_1$ до пересечения с горизонтальной осью. Точка n определит расстояние, на которое должен быть передвинут груз p.

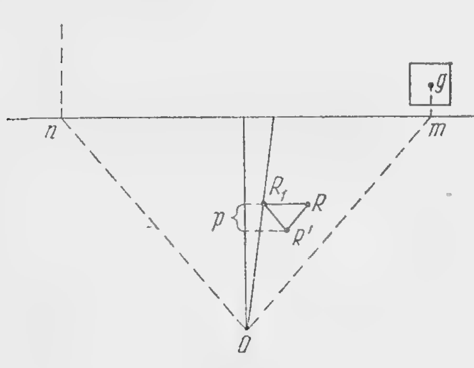


Рис. 149.

Исправление остойчивости. Пусть точка R соответствует такому состоянию судна, при котором его остойчивость недостаточна. Путем перенесения груза из более высокого положения в более низкое следует добиться требуемой минимальной остойчивости. Пусть, например, желательно, чтобы точка R оказалась не выше кривой опасных нагрузок или чтобы метацентрическая высота достигла требуемых размеров.

В первом случае необходимо на боковой диаграмме перевести точку R по вертикали вниз до совпадения с кривой опасных нагрузок, во втором — до совпадения с кривой, соответствующей заданной метацентрической высоте.

Тем или иным путем искомое положение точки R_1 определено (рис. 150).

Допустим, что имеется возможность переносить грузы из g в g_1. Требуется определить количество груза, которое надо перенести для достижения указанной цели. Проводятся лучи для g и g_1. Из точек R и R_1 проводятся параллельные им прямые до пересечения в точке R'. Расстояние до этой точки, измеренное по горизонтали, дает искомую величину груза p.

Если задана величина груза p и требуется определить, на какую высоту его надо опустить от положения g, то следует поступать следующим образом.

Проводится луч для g_1, параллельно ему переносится точка R в R' так, чтобы горизонтальное смещение равнялось p. Соединяются точки R' с R_1 и параллельно $R'R_1$ проводится луч из точки O. Пересечение этого луча с вертикальной осью определяет уровень, до которого должен быть опущен груз p.

Для возможности суждения об остойчивости корабля при больших наклонениях для разных случаев нагрузок, могущих иметь место при

эксплоатации корабля, Г. Е. Павленко предложил вторую диаграмму, названную им **универсальной диаграммой остойчивости**. Для построения диаграммы следует принять такой метод разделения плеча остойчивости на плечо остойчивости формы и плечо

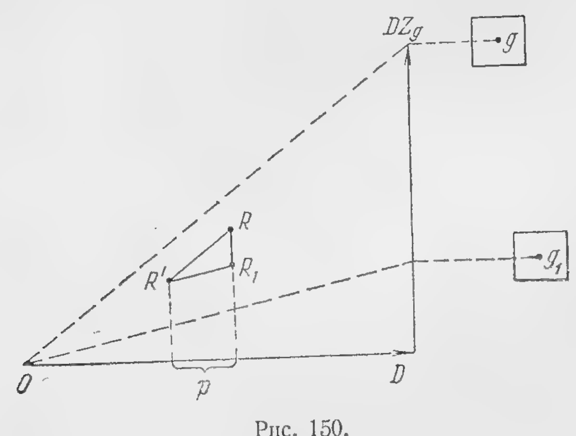


Рис. 150.

остойчивости веса, при котором одна часть зависела бы только от водоизмещения судна V и угла крена θ, а другая от возвышения ЦТ над основной Z_g и угла θ.

Такое подразделение осуществляется, если принять

$$l = l_V - l_g, \tag{849}$$

где

$$l_{V_1} = y\cos\theta + z_1\sin\theta, \tag{850}$$

$$l_{g_1} = Z_g\sin\theta, \tag{851}$$

$$z_1 = z + z_c.$$

Здесь y и z — координаты центра величины корабля при наклонении на угол θ, определяемые формулами (165) § 33. Если построить на общем чертеже семейство кривых l_{V_1} для ряда водоизмещений и семейства кривых l_{g_1} для ряда Z_g, то можно получить универсальную диаграмму остойчивости, так как разность между любой парой кривых l_{V_1} и l_{g_1} давала бы диаграмму статической остойчивости, соответствующую принятому водоизмещению V и возвышению ЦТ над основной Z_g.

Для лучшей компактности расположения кривых на чертеже Г. Е. Павленко рекомендует принимать

$$l_V = l(V_0, \theta) - l_{V_1}, \tag{852}$$

$$l_g = l(V_0, \theta) - l_{g_1}, \tag{853}$$

где $l(V_0, \theta)$ — диаграмма статической остойчивости при некотором среднем водоизмещении V из числа возможных при эксплоатации

корабля. Так как при этом обе части плеча остойчивости становятся на большом протяжении отрицательными, то у них одновременно изменен знак, что не влияет на абсолютную величину разности.

Первая часть кривых изображается при этом (рис. 151) в виде семейства при параметре V, а вторая — в виде другого семейства при параметре Z_g. Этим достигаются наименьшая деформация диаграмм остойчивости и наиболее компактное расположение их на чертеже.

В результате для каждого сочетания значений V и Z_g имеется готовая диаграмма остойчивости, у которой нижняя кривая заменяет

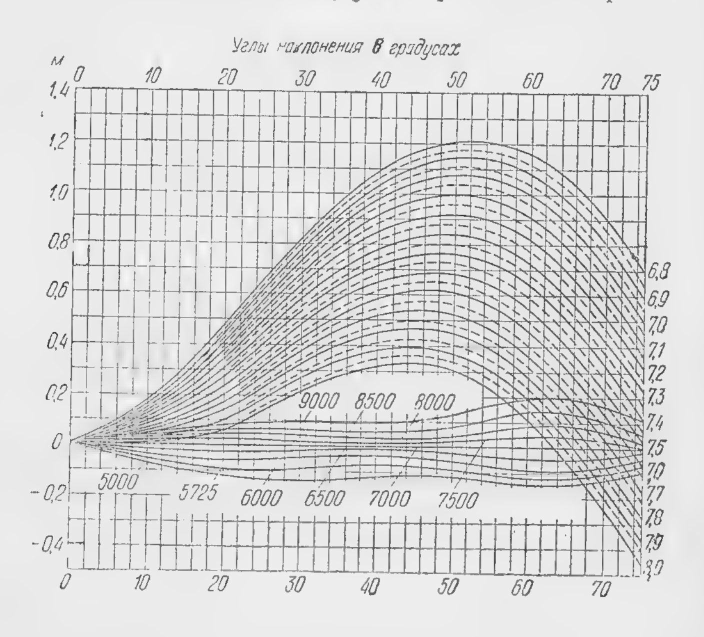


Рис. 151.

ось абсцисс обычной диаграммы остойчивости. По универсальной диаграмме возможно прочесть для любых случаев нагрузки угол заката статической остойчивости, положение максимума и другие интересующие элементы.

Для построения универсальной диаграммы находится обычным способом кривая центров величины (кривая C) § 33 для водоизмещения V_0, принимаемого за исходное (рис. 152).

Путем проведения линий сил поддержания находятся точки пересечения их со следом диаметральной плоскости (квазиметацентры).

Из произвольно взятого центра тяжести G_1 опускаются перпендикуляры на линии поддержаний. Длины этих перпендикуляров дают ординаты кривой l_g для положения G_1. Таким же образом находятся ординаты всех других кривых l_g для различных положений центра тяжести.

Построив кривую центров величины для любого водоизмещения V_1, отличающегося от V_0, можно получить ординаты кривой l_{V_1}, как длины перпендикуляров, опущенных на новые линии поддержания из квазиметацентров, ранее полученных для V_0 (рис. 152). Имея определенные таким образом величины l_V для двух-трех водоизмещений, можно для промежуточных водоизмещений получить их путем интерполяции.

Рис. 152.

Проф. Г. Е. Павленко предложил также применить взамен диаграммы динамической остойчивости **диаграмму средних моментов** для

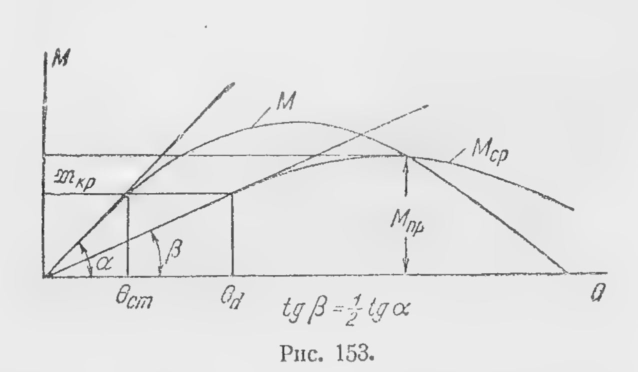


Рис. 153.

целей определения динамических углов крена в случае постоянной кренящей пары и для определения предельного момента.

Ординаты кривой средних моментов определяются зависимостью:

$$M_{ср} = \frac{Dl_d}{\theta} = \frac{D}{\theta}\int\limits_0^\theta l\,d\theta, \qquad (854)$$

где l_d — плечи динамической, а l — плечи статической остойчивости.

Вид диаграммы средних моментов показан на рис. 153:

M — моменты статической остойчивости, $M_{ср}$ — средние моменты. Тангенс наклона касательной к диаграмме средних моментов в начале координат равен половине тангенса угла, составляемого касательной к диаграмме статической остойчивости и осью абсцисс, т. е. при $\theta = 0$:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{dM_{ср}}{d\theta} = \frac{1}{2}\,\frac{dM}{d\theta}. \qquad (855)$$

Максимум кривой $M_{ср}$ лежит в точке пересечения кривых $M_{ср}$ и M и равен предельному динамическому моменту. Динамический угол крена при действии постоянной кренящей пары $\mathfrak{M}_{кр}$ равен абсциссе точки пересечения прямой $\mathfrak{M}_{кр}$ с диаграммой средних моментов. Диаграмма средних моментов может быть построена как в масштабе

моментов, так и в масштабе плеч. В этом случае кренящая пара задается в виде приведенного кренящего плеча:

$$l_{\text{кр}} = \frac{\mathfrak{M}_{\text{кр}}}{D}. \tag{856}$$

Подобно универсальной диаграмме статической остойчивости может быть построена универсальная диаграмма средних плеч путем построения двух семейств кривых:

$$\overline{l}_{(V)} = \frac{1}{\theta}\int_0^\theta l_V d\theta, \tag{857}$$

$$\overline{l}_{(g)} = \frac{1}{\theta}\int_0^\theta l_g\, d\theta, \tag{858}$$

где l_V и l_g определяются выражениями (852) и (853). Ординаты средних плеч равны:

$$\overline{l}_{\text{ор}} = \overline{l}_{(V)} - \overline{l}_{(g)}. \tag{859}$$

Семейства $\overline{l}_{(V)}$ и $\overline{l}_{(g)}$ удобно вычертить на двух отдельных чертежах (рис. 154 и 155), причем одно из них желательно на прозрачной кальке. Тогда, наложив диаграмму $\overline{l}_{(V)}$ на диаграмму $\overline{l}_{(g)}$ таким обра-

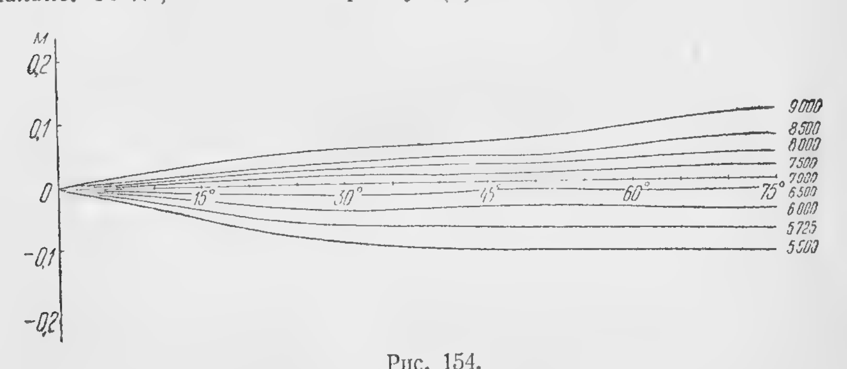


Рис. 154.

зом, чтобы начало первой было сдвинуто вверх по оси ординат второй кривой на расстояние, равное заданному приведенному кренящему плечу $l_{\text{кр}}$, можно получить значение динамического угла крена, как абсциссу точки пересечения кривых $\overline{l}_{(V)}$ и $\overline{l}_{(g)}$, соответствующих данным D и Z_g.

Для нахождения предельных моментов начало координат диаграммы $\overline{l}_{(V)}$ сдвигается вдоль оси диаграммы $\overline{l}_{(g)}$ до тех пор, пока кривые $\overline{l}_{(V)}$ и $\overline{l}_{(g)}$, соответствующие заданным значениям D и Z_g, станут касательными. Величина, на которую потребовалось сдвинуть диаграмму, дает значение предельного плеча $l_{\text{пр}}$. Произведение $Dl_{\text{пр}}$ дает величину предельного момента.

С помощью универсальной диаграммы можно построить кривую опасных нагрузок. Для этого строятся кривая опасных кренящих моментов $\mathfrak{M}_{кр\,0}$ в функции от водоизмещения и приведенные кренящие плечи $l_{кр\,0} = f(D) = \frac{\mathfrak{M}_{кр\,0}}{D}$.

Для каждого значения D накладываются диаграммы $\bar{l}_{(V)}$ и $\bar{l}_{(g)}$ так, как это указано выше, пользуясь соответственным значением приведенного плеча. При этом отыскивается та кривая $\bar{l}_{(g)}$, которая будет иметь касание с кривой $\bar{l}_{(V)}$, соответствующей данному D. Значение Z_g,

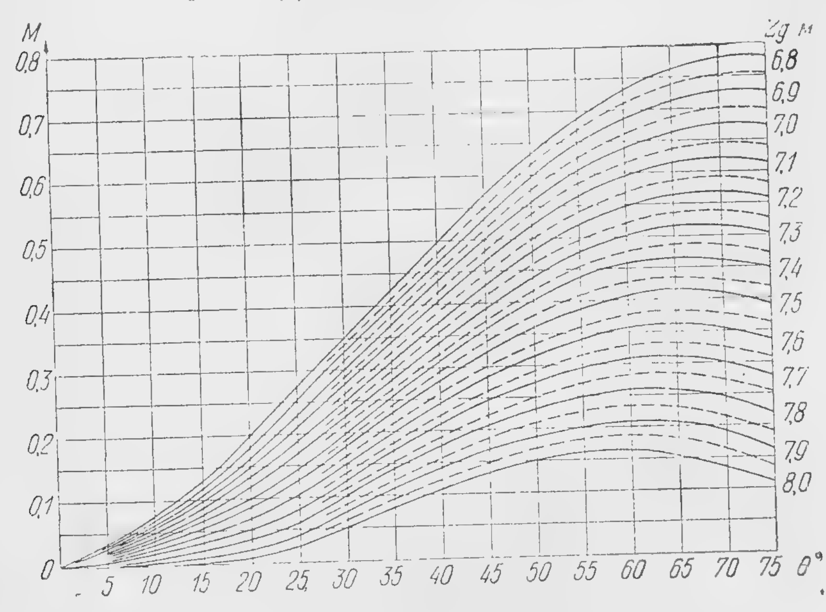


Рис. 155.

соответствующее найденной кривой, будет той предельной ординатой центра тяжести, превышение которой сопряжено с опасностью опрокидывания судна динамическим действием кренящего момента $\mathfrak{M}_{кр\,0}$. Таким образом, для каждого D находится соответствующее ему предельное значение Z_g и, следовательно, произведение DZ_g.

Вычисления универсальной диаграммы средних моментов могут быть произведены по универсальной диаграмме плеч остойчивости. При этом плечи $\bar{l}_{(V)}$ вычисляются по схеме

$$\bar{l}_{(V)} = \frac{1}{n} \sum_{0}^{n} l_V, \qquad (860)$$

где $\sum_{0}^{n} l_V$ — интегральные суммы.

Плечи $\overline{l_g}$ вычисляются для одного значения Z_g как интегральные суммы:

$$\overline{l}_{(g)} = \frac{1}{n} \sum_{0}^{n} l_g. \tag{861}$$

Для прочих величин Z_g они получаются путем поправок, вычисленных для принятого ΔZ_g по формуле:

$$\Delta \overline{l}_{(g)} = \frac{1 - \cos \theta}{\theta} \Delta Z_g. \tag{862}$$

§ 93. ОСНОВЫ СТАТИКИ СУДОПОДЪЕМА

В практике подъема затонувших кораблей приходится встречаться с самыми разнообразными условиями, и потому методы подъема кораблей могут быть различны. При выборе метода подъема необходимо учитывать глубину затопления, размеры корабля, его тип, положение на грунте, характер повреждения, характер грунта, наличие течения, приливов и отливов, удаленность от баз и наличие судоподъемных и прочих технических средств.

Наиболее распространенные методы подъема затонувших кораблей могут быть классифицированы по следующим основным признакам.

I. По последовательности подъема корабля с грунта на поверхность:

1. Непосредственный подъем с грунта на поверхность воды.
2. Ступенчатый подъем.
3. Зигзагообразный подъем.

II. По природе подъемных сил:

1. Подъем с использованием механических усилий, пловучих кранов, лебедок, талей, судоподъемных винтов и т. п.

2. Подъем с использованием сил пловучести:

1) судоподъемными понтонами;
2) осушением отсеков затонувшего корабля;
3) использованием пловучести барж и прочих подъемных сооружений;
4) наполнением отсеков корабля пустыми бочками, бамбуком, пробкой и т. п.

III. Прочие способы подъема:

1) электромагнитами;
2) постройкой дамбы вокруг затонувшего корабля и осушением образованного дамбой бассейна;
3) вымораживанием.

IV. Смешанный способ подъема с комбинированным применением различных средств.

В дальнейшем рассматриваются обстоятельства подъема корабля с помощью осушения отсеков и присоединения к нему судоподъемных понтонов, так как способ этот наиболее распространен и расчеты к нему требуют применения зависимостей статики корабля.

Непосредственный подъем судна с грунта на поверхность воды рассматриваемым способом обычно применяется с глубины, не превышающей $^1/_3$ длины корабля. При больших глубинах диферент поднимаемого судна при всплытии его одной оконечностью получается чрезмерно большим, что может привести к скольжению понтонных стропов и затруднит их найтовку.

При подъеме с больших глубин применяют чаще всего либо ступенчатый метод подъема, либо зигзагообразный. Сущность ступенчатого метода состоит в том, что корабль с помощью понтонов поднимается над грунтом и буксируется на более мелкое место, где ставится на грунт для перестропки. При подъеме корабля этим методом часть понтонов крепится к кораблю на длинных стропах (рис. 156) с таким расчетом, чтобы при выходе этих понтонов из воды дальнейший подъем корабля прекратился.

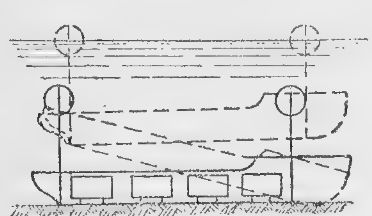



Рис. 156.

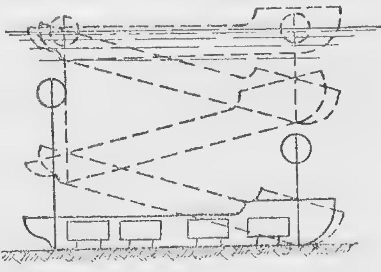


Рис. 157.

Зигзагообразный метод является, в сущности говоря, разновидностью ступенчатого. Корабль поднимается ступенями поочередно то одной, то другой оконечностью, для чего помимо понтонов, устанавливаемых для непосредственного подъема по борту, на длинных стропах крепятся понтоны, ограничивающие высоту подъема на каждую ступень (рис. 157). Первоначально продувают часть понтонов, располагаемых в середине корабля, и частично концевых. Недостающую подъемную силу дают вспомогательные понтоны, которые после отрыва оконечности от грунта всплывут на поверхность и, потеряв подъемную силу, приостановят подъем корабля. Затем продуваются понтоны со стороны другой оконечности и она поднимается на следующую ступень и т. д.

Ниже излагается метод расчета всплытия, разработанный Ю. А. Шиманским, с коррективами и дополнениями к нему, предложенными В. Ф. Кюнстлером и Г. А. Фирсовым. Метод излагается применительно к непосредственному подъему, но приводимые зависимости и расчетные схемы могут быть распространены на условия ступенчатого и зигзагообразного подъема.

Расчеты остойчивости по этому методу не учитывают влияния возможного начального крена затонувшего корабля. Если этот крен велик, больше 15—20°, то тогда процесс подъема приходится делить на две стадии:

1) выравнивание корабля;

2) подъем корабля.

Если же начальный крен не превосходит 15—20°, то часто производят непосредственный подъем. В этом случае должны приниматься тщательные меры для обеспечения остойчивости: приложение пловучести от понтонов и прочих подъемных усилий с одного борта, осушение отсеков наклоненного борта и т. д. В этом случае приводимые ниже формулы для расчета остойчивости не применимы.

Условия начала всплытия одной оконечности судна. Действующие на судно в момент начала всплытия одной его оконечности силы могут быть приведены к двум группам.

1. Силы веса судна в воде и силы присоса к грунту. Равнодействующая этих сил составляет отрывной вес судна $P_{отр}$, направлена вертикально вниз и для простоты считается приложенной в центре тяжести судна. Величина $P_{отр}$ может быть вычислена по формуле

$$P_{отр} = P(1+f), \qquad (863)$$

где P — подъемный вес судна, равный весу всех конструкций корабля в воде; f — коэффициент силы присоса грунта. По статистическим данным А. Н. Шмырева, примерные величины коэффициентов силы присоса для различных грунтов имеют значения, приведенные в табл. 104.

Таблица 104

Коэффициенты присоса

Характер грунта	Значения коэффициентов присоса f
Скала с галькой и песком	от 0 до 0,05
Крупный песок	„ 0,05 „ 0,10
Галька с мелким песком	„ 0,10 „ 0,15
Мелкий песок	„ 0,15 „ 0,20
Ил с мягкой глиной внизу	„ 0,15 „ 0,20
Ил с плотной и вязкой глиной	„ 0,20 „ 0,25
Вязкая плотная глина с песком или ракушкой	„ 0,25 „ 0,45

2. Направленная вертикально вверх равнодействующая сил поддержания или пловучести D, равная весу воды в объеме осушенной части отсеков судна и присоединенных к нему добавочных пловучестей в виде судоподъемных понтонов и т. п. Точка приложения силы D находится в общем центре тяжести осушенных объемов. Если понтоны скреплены с судном при отсутствии неизменной связи, точку приложения к судну усилий их пловучестей следует считать в точке подвеса пловучести.

При составлении моментов сил принимается связанная с судном система координат (рис. 158), начало которой O лежит в точке опоры оставшейся на грунте оконечности судна; ось OX направлена параллельно основной в сторону всплывающей оконечности, ось OZ — нормально к ней вверх.

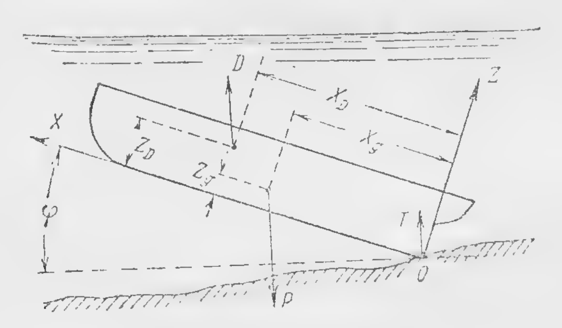


Рис. 158.

Условие начала всплытия судна определяется зависимостью:

$$D(X_D - Z_D \operatorname{tg} \varphi_1) > P_{\text{отр}}(X_g - Z_g \operatorname{tg} \varphi_1) - \sum j \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (864)$$

Здесь обозначено:

X_g, Z_g — координаты центра тяжести судна;

X_D, Z_D — координаты точки приложения равнодействующей сил поддержания;

φ_1 — начальный угол диферента судна, лежащего на грунте, т. е. угол наклона основной к горизонту, считаемый положительным, если он направлен в сторону вращения всплывающей оконечности;

$\sum j$ — сумма моментов инерции площадей свободных уровней воды во всех отсеках относительно поперечных осей, проходящих через их центры тяжести.

В действительности ось вращения всплывающего корабля существенно перемещается в процессе подъема вследствие сминаемости грунта, однако при составлении зависимости (864) в первом приближении предположено, что она остается неизменной и расположена вблизи штевня, опирающегося на грунт.

Для вычисления величин D, X_D, Z_D и $\sum j$ может служить табл. 105. Величины j могут быть вычислены по формуле:

$$j = \frac{bl^3}{12},$$

где l — длина отсека;

b — его ширина.

Таблица 105

Расчет элементов силы поддержания всплывающего судна

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Наименование отсеков	D_i	X_{Di}	Z_{Di}	$D_i X_{Di}$ II · III	$D_i Z_{Di}$ II · IV	j_i	i_i
Суммы	$\sum_2$	—	—	$\sum_5$	$\sum_6$	$\sum_7$	$\sum_8$

В графе VIII табл. 105 выписываются моменты инерции этих же поверхностей, но относительно продольных осей, т. е. величины

$$i = \frac{lb^3}{12}.$$

По данным табл. 105 вычисляются:

$$\left.\begin{aligned} D &= \sum\nolimits_2 \\ X_D &= \frac{\sum_5}{\sum_2} \\ Z_D &= \frac{\sum_6}{\sum_2} \\ \sum j &= \sum\nolimits_7 \end{aligned}\right\} \qquad (865)$$

Первый период всплытия—до остановки судна либо до начала выхода из воды всплывающей оконечности. Наихудшие условия для остойчивости судна в этом периоде будут в случае всплытия со скалистого грунта, для которого коэффициент силы присоса равен нулю. Мера остойчивости поднимаемого судна определится по формуле Кюнстлера, предполагающей отсутствие начального крена:

$$r = \left(\frac{D}{P} Z_D - Z_g - \frac{R}{P} Z_R - \frac{\sum i}{P}\right) \cos\varphi. \qquad (866)$$

Здесь R — сила сопротивления воды движению всплывающего судна;

Z_R — ордината точки ее приложения.

Сила R сопротивления воды всплытию имеет наибольшее значение при наступлении установившегося движения с постоянной скоростью. Величина силы R может быть определена по формуле:

$$R = \frac{D(X_D - Z_D \operatorname{tg} \varphi_2) - P(X_g - Z_g \operatorname{tg} \varphi_2) + \sum j \operatorname{tg} \varphi_2}{X_R - Z_R \operatorname{tg} \varphi_2}, \qquad (867)$$

или более приближенно

$$R \cong \frac{DX_D - PX_g + \sum j \operatorname{tg} \varphi_2}{X_R}, \qquad (868)$$

где X_R — абсцисса точки приложения силы сопротивления, принимаемая равной $X_R = 0{,}6 \div 0{,}8\ L$.

Ордината Z_R силы сопротивления согласно исследованию Фирсова должна приниматься равной

$$Z_R \cong H - 0{,}1B, \qquad (869)$$

где H — высота верхней палубы над основной;

B — наибольшая ширина судна по палубе.

Наименьшее значение мера остойчивости имеет в момент выхода из воды всплывающей оконечности либо после остановки судна при ступенчатом подъеме, когда угол дифферента достигнет наибольшей возможной величины $\varphi = \varphi_2$.

Условие положительной остойчивости всплывающего судна характеризуется неравенством

$$r > 0. \qquad (870)$$

Применяя формулы (866) и (870), следует учитывать следующее: в основу их приняты допущения, что корабль не углубляется в грунт и что грунт не мешает кораблю крениться. Большей частью оба эти условия на практике не имеют места и действительная остойчивость корабля, всплывшего одной оконечностью, может быть значительно выше, чем получаемая расчетом по приведенным формулам.

Формулы, относящиеся к первому периоду всплытия, применимы для промежуточных ступеней при ступенчатом и зигзагообразном методах подъема до начала выхода из воды всплывающей оконечности. Начало координат при этом принимается каждый раз на оси вращения не всплывающей оконечности.

Второй период всплытия — от начала выхода из воды всплывающей оконечности до остановки судна. Угол дифферента φ_3, определяющий конец второго периода, т. е. то положение судна, которое оно примет в результате всплытия и частичного выхода из

воды одной из его оконечностей (рис. 159), определяется выражением (871):

$$v(X_v - Z_v \operatorname{tg} \varphi_3) = DX_D - PX_g - (DZ_D - PZ_g - \sum j) \operatorname{tg} \varphi_3, \quad (871)$$

где v — объем вышедшей из воды части корпуса, меняющийся при изменении диферента φ;

X_v и Z_v — координаты центра тяжести этого объема.

Для нахождения угла φ_3 по выражению (871) необходимо иметь зависимость между углом диферента φ и величинами v, X_v и Z_v.

Зависимость эта может быть найдена по схеме, предложенной Ю. А. Шиманским.

Из рассмотрения рис. 159 видно, что для построения ватерлинии, отвечающей заданному углу диферента φ, нужно из точки вращения O провести прямую под углом φ к поперечному сечению судна и, отложив на этой прямой отрезок OA, равный глубине погружения H точки вращения, провести через конец отрезка OA перпендикулярную линию, которая и представит искомую ватерлинию (рис. 160).

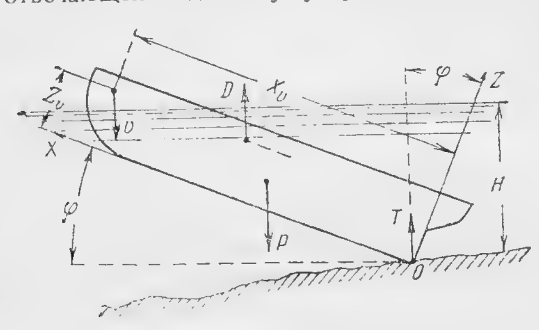


Рис. 159.

Приращение объема, соответствующее изменению угла крена от угла φ_2 до угла φ, определяется зависимостью:

$$v = \int_{\varphi_2}^{\varphi} S_\varphi t_\varphi \, d\varphi. \quad (872)$$

Координаты его центра тяжести равны:

$$X_v = \frac{1}{v} \int_{\varphi_2}^{\varphi} S_\varphi t_\varphi X_s \, d\varphi, \quad (873)$$

$$Z_v = \frac{1}{v} \int_{\varphi_2}^{\varphi} S_\varphi t_\varphi Z_s \, d\varphi, \quad (874)$$

где S_φ — площадь ватерлинии, соответствующая переменному углу φ; t_φ — отстояние центра тяжести этой площади до конца отрезка OA;

X_s и Z_s — координаты центра тяжести площади S_φ (рис. 160). Таким образом, расчет величин v, X_v и Z_v сводится к вычислению интегралов с верхним переменным пределом.

Для этого на чертеже судна строятся ватерлинии для нескольких углов дифферента, взятых через равные интервалы $\Delta\varphi$, начиная с угла φ_2, т. е. для углов φ_2, $\varphi_2+\Delta\varphi$, $\varphi_2+2\Delta\varphi$ и т. д., и определяются по чертежу значения величин S_φ, t_φ, X_s, Z_s.

Схема расчета величин v, X_v и Z_v приведена в табл. 106.

По найденным значениям v, X_v и Z_v в столбцах I—VIII табл. 107 вычисляется левая часть равенства (871), а в столбцах IX и X правая часть его. Входящие в правую часть величины D, X_D, Z_D, j предварительно рассчитываются по схеме табл. 105.

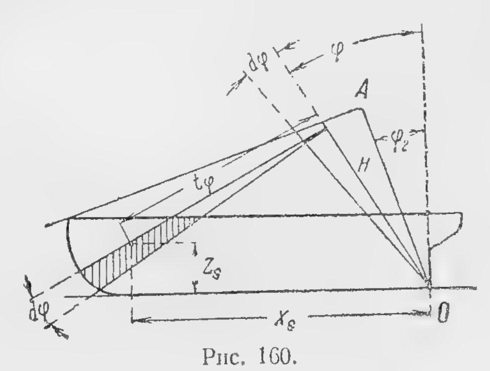


Рис. 160.

По найденным в табл. 107 значениям левой и правой частей выражения (871) следует построить кривые AB и CD, показанные на рис. 161. Точка пересечения этих кривых определит собой искомое значение угла дифферента φ_3, при котором всплывающее судно достигнет положения равновесия.

Таблица 106

Расчет элементов объема вышедшей из воды части корпуса

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Углы φ	S_φ	t_φ	X_s	Z_s	II · III	Интегральные суммы VI	$v=\frac{\Delta\varphi}{2}\cdot$ VII	VI · IV	Интегральные суммы IX	$X_v=$ X : VII	VI · V	Интегральные суммы XII	$Z_v=$ XIII : VII
φ_2 $\varphi_2+\Delta\varphi$ $\varphi_2+2\Delta\varphi$	0 —	0 —	0 —	0 —	0 —								

Третий период — от окончания второго периода до начала всплытия лежащей на грунте оконечности судна. После прекращения всплытия одной оконечности при угле дифферента φ_3 дальнейшее всплытие возможно лишь за счет увеличения сил поддержания с помощью дальнейшего осушения отсеков или добавления новых плавучестей. Углы дифферента φ судна при этом будут изменяться вплоть до начала всплытия лежащей на грунте оконечности. Величины углов φ могут быть определены следующим образом.

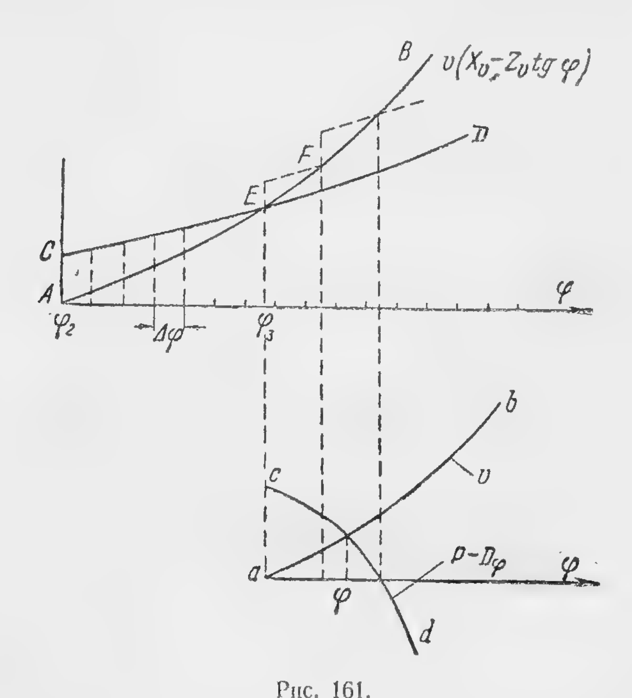


Рис. 161.

Пусть требуется узнать положение судна после придания ему добавочных сил поддержания равных ΔD, приложенных в точке с координатами X_Δ и Z_Δ, причем момент инерции поверхностей уровня воды в отсеках увеличился на величину $\Delta\sum j$.

Правая часть выражения (871) при заданном изменении сил поддержания увеличится на величину

$$\Delta D\,(X_\Delta - Z_\Delta \operatorname{tg}\varphi) + \Delta \sum j \operatorname{tg}\varphi, \qquad (875)$$

где значение угла φ может быть принято равным углу φ_3. Вычислив эту величину, следует отложить ее вверх от точки E (рис. 161) и через полученную точку провести линию, параллельную кривой CD до пересечения с кривой AB в точке F. Угол дифферента, соответ-

ствующий точке F, определит искомое положение равновесия судна, соответствующее заданному увеличению сил поддержания.

Подобным построением следует определить несколько значений углов диферента судна для нескольких заданных значений ΔD.

Таблица 107

Расчет вспомогательных графиков к определению положения равновесия судна, всплывшего одной оконечностью

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
φ	$\operatorname{tg}\varphi$	v	X_v	Z_v	$Z_v \operatorname{tg}\varphi$ II·V	$X_v - Z_v \operatorname{tg}\varphi$ IV—VI	$v(X_v - Z_v \operatorname{tg}\varphi)$ III·VII	$(DZ_D - PZ_g - \sum j) \operatorname{tg}\varphi$	$(DX_D - PX_g) -$ —IX
φ_2									
$\varphi_2 + \Delta\varphi$									
$\varphi_2 + 2\Delta\varphi$									
.									
.									

Для определения угла диферента φ_4, соответствующего моменту начала всплытия лежащей на грунте оконечности судна, служит уравнение

$$v = D_\varphi - P. \quad (876)$$

Уравнение это решается графически путем построения кривых, указанных в нижней части рис. 161. По данным табл. 106 строится кривая ab, выражающая зависимость объемов v от угла диферента φ. По данным, полученным в описанном процессе нахождения углов диферента φ, при заданном увеличении сил поддержания, строится кривая cd, выражающая изменение силы $P - D_\varphi$ в функции от угла φ, где D_φ — суммарная сила поддержания.

Искомый угол φ_4, отвечающий моменту начала всплытия лежащей на грунте оконечности судна, определяется абсциссой точки пересечения кривых ab и cd.

Четвертый период всплытия — от начала всплытия лежащей на грунте оконечности до полного всплытия судна. Пусть требуется найти силы поддержания, необходимые для того, чтобы всплывшее судно приняло положение, определяемое заданной ватерлинией AB, при которой объем вышедшей из воды части корпуса равен v_1 и координаты центра тяжести этого объема равны X_1 и Z_1. Из условия равновесия сил, действующих на судно, находим, что необходимые силы поддержания (равные весу воды в объеме осушенных отсеков судна и понтонов) должны удовлетворять условию:

$$D(X_D - Z_D \operatorname{tg} \varphi_5) = P(X_g - Z_g \operatorname{tg} \varphi_5) + \\ + v_1(X_1 - Z_1 \operatorname{tg} \varphi_5) - \sum j \operatorname{tg} \varphi_5, \qquad (877)$$

где φ_5 — угол диферента, соответствующий ватерлинии AB.

Из сопоставления величины $D(X_D - Z_D \operatorname{tg} \varphi_5)$, вычисленной по выражению (877) с аналогичной величиной, полученной по известным для начала четвертого периода значениям D, X_D, Z_D и φ_4, можно подбором определить добавочные силы поддержания, необходимые для того, чтобы судно всплыло по заданную ватерлинию.

Необходимо учитывать, что часто остойчивость корабля в начале четвертого периода оказывается критической для всего процесса подъема, ибо при отрыве оконечности поддерживающее влияние вязкого грунта внезапно исчезает. Поэтому необходимо стремиться, чтобы к этому времени осушением соответствующих отсеков была создана необходимая остойчивость формы. Рекомендуется до начала четвертого периода осушить до суха все мелкие отсеки, не вызывающие всплытия судна.

РАЗДЕЛ 2

КАЧКА КОРАБЛЯ

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАВИСИМОСТИ

Качкой судов называется колебательное движение, которое может совершать судно, как абсолютно твердое тело, при плавании его на поверхности спокойной или взволнованной воды. Обычно качка судов вызывается действием волн, причем нередко бывает, что даже близкие по типу суда при совместном плавании различным образом ведут себя на одинаковом волнении. Теорией качки установлено, что степень подверженности судов качке в значительной мере зависит от характера качки их на тихой воде.

Различают четыре вида качки судов:

1. Бортовая или боковая качка, представляющая вращательное колебательное движение вокруг продольной оси.

2. Килевая качка, представляющая вращательное колебательное движение вокруг поперечной оси.

3. Вертикальная качка, представляющая поступательное колебательное движение в вертикальном направлении.

4. Общий случай качки, представляющий ту или иную комбинацию перечисленных видов качки.

Качка влечет за собой ряд вредных, а иногда катастрофических последствий, главнейшие из которых могут состоять в следующем:

1) опрокидывание судна при боковой качке вследствие потери остойчивости;

2) общие или местные разрушения частей корпуса и отдельных сооружений на нем вследствие возникновения при качке сил инерции;

3) заливание палубы водой вследствие зарывания бортов или оконечностей под поверхность волны;

4) нарушение работы находящихся на корабле установок вследствие влияния возникающих при качке динамических нагрузок;

5) ухудшение меткости, а иногда и невозможность орудийной или торпедной стрельбы;

6) уменьшение скорости хода судна вследствие возрастания сопротивления воды при качке и ухудшения условий работы движителя;

7) вредное физиологическое действие на людей, морская болезнь и др.

Теория качки судов является одной из наиболее сложных проблем теории корабля и до настоящего времени не может быть при-

знана достаточно разработанной. Общий метод исследования качки и основные приемы ее расчета разработаны акад. А. Н. Крыловым и опубликованы в 1897 г. Однако необходимость пользоваться при расчетах качки не всегда надежными эмпирическими данными и неизбежность введения ряда упрощающих допущений вносит в расчеты качки элемент условности и заставляет оценивать результаты их лишь как первое приближение к действительности.

Основные упрощающие допущения при расчетах качки обычно сводятся к следующему:

1. Предполагается, что на каждую точку погруженной поверхности корабля действует такое же давление, какое имело бы место в той же точке объема взволнованной жидкости при отсутствии корабля.

2. Волны предполагаются правильными, цилиндрическими с синусоидальным профилем.

3. В большинстве расчетов предполагается, что амплитуды качки и соответствующие им скорости и ускорения малы, так что высшими степенями их по сравнению с первой можно пренебречь.

4. Обводы корабля в районе изменения ватерлинии большей частью считаются прямостенными.

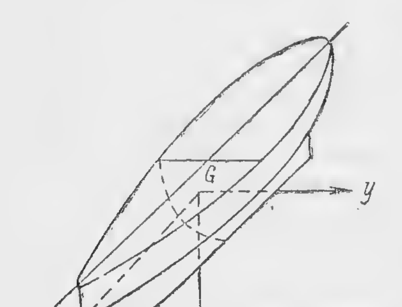


Рис. 1.

При исследовании качки судов берут две системы координатных осей, одна из которых неразрывно связана с судном и в дальнейшем называется относительной, а другая неподвижна в пространстве и называется абсолютной. При исследовании общего случая качки удобнее всего выбрать системы осей, указанные акад. А. Н. Крыловым. Первая система $oxyz$ имеет начало координат в центре тяжести G судна, а координатные оси совпадают с главными осями инерции корабля. Ось ox направлена в нос и практически горизонтальна, ось oy направлена на левый борт, ось oz — вертикально вниз. Расположение осей в корабле показано на рис. 1. Вторая система $\Omega\xi\eta\zeta$ выбирается таким образом, чтобы при равновесии судна в положении покоя обе системы координатных осей совпадали.

Мгновенное положение судна при качке характеризуется в общем случае координатами ξ_0, η_0, ζ_0 центра тяжести G судна и тремя эйлеровыми углами ψ, θ, φ, причем система эйлеровых углов берется не астрономическая, а корабельная, предложенная акад. А. Н. Крыловым. Соответствующее ей расположение эйлеровых углов показано на рис. 2.

За линию узлов ON здесь принята линия пересечения двух взаимно перпендикулярных друг другу в положении покоя плоскостей: $\xi O\zeta$ и xoy. Угол $\psi = \angle \xi ON$ приблизительно равен углу диферента и измеряется в плоскости $\xi O\zeta$, соответствуя повороту вокруг оси $O\eta$.

Положительное направление ψ соответствует диференту на корму, а не на нос, как обычно. Угол $\theta = \theta_1 - 90^\circ$ приблизительно равен углу крена и соответствует повороту вокруг линии узлов ON. Положительное направление θ соответствует крену на левый (а не на правый) борт. Угол $\varphi = \angle Nox$ приблизительно равен углу рыскания

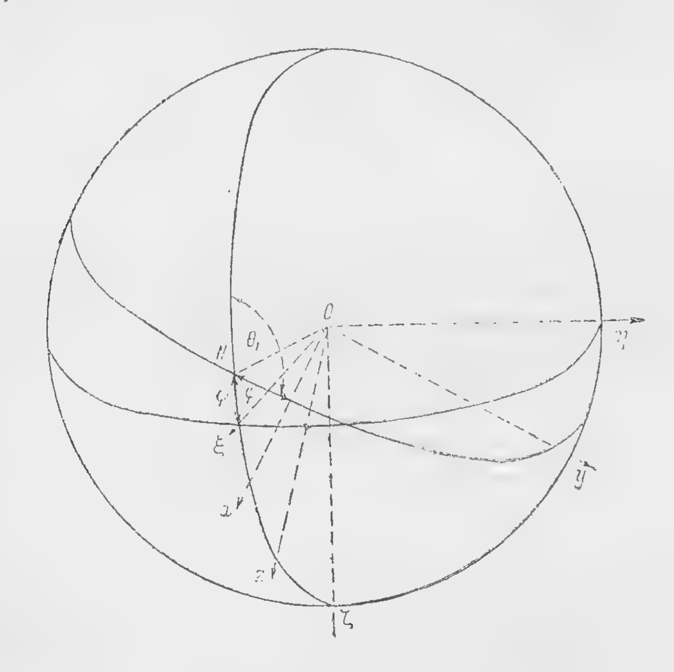


Рис. 2.

и измеряется в плоскости xoy и соответствует повороту вокруг оси oz. Положительное направление φ соответствует повороту корабля налево.

Связь между подвижными и неподвижными координатами устанавливается на основании таблицы косинусов:

	x	y	z
ξ	a_1	b_1	c_1
η	a_2	b_2	c_2
ζ	a_3	b_3	c_3

Все девять косинусов выражаются через эйлеровы углы следующими формулами:

$$
\left.\begin{aligned}
a_1 &= \cos(x, \xi) = \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi\sin\theta \\
a_2 &= \cos(x, \eta) = \sin\varphi\cos\theta \\
a_3 &= \cos(x, \zeta) = -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\cos\psi\sin\theta \\
b_1 &= \cos(y, \xi) = -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\sin\theta \\
b_2 &= \cos(y, \eta) = \cos\varphi\cos\theta \\
b_3 &= \cos(y, \zeta) = \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi\sin\theta \\
c_1 &= \cos(z, \xi) = \sin\psi\cos\theta \\
c_2 &= \cos(z, \eta) = -\sin\theta \\
c_3 &= \cos(z, \zeta) = \cos\psi\cos\theta
\end{aligned}\right\} \qquad (1)
$$

Формулы перехода от абсолютных координат к относительным, и наоборот, будут:

$$
\left.\begin{aligned}
\xi &= \xi_0 + a_1x + b_1y + c_1z \\
\eta &= \eta_0 + a_2x + b_2y + c_2z \\
\zeta &= \zeta_0 + a_3x + b_3y + c_3z
\end{aligned}\right\} \qquad (2)
$$

$$
\left.\begin{aligned}
x &= a_1(\xi - \xi_0) + a_2(\eta - \eta_0) + a_3(\zeta - \zeta_0) \\
y &= b_1(\xi - \xi_0) + b_2(\eta - \eta_0) + b_3(\zeta - \zeta_0) \\
z &= c_1(\xi - \xi_0) + c_2(\eta - \eta_0) + c_3(\zeta - \zeta_0)
\end{aligned}\right\} \qquad (3)
$$

Положение корабля в момент времени t определяется координатами ξ_0, η_0 и ζ_0 его центра тяжести и тремя эйлеровыми углами φ, ψ, θ. В положении покоя корабля все эти шесть величин равны нулю.

Диференциальные уравнения движения корабля распадаются на две группы:

1) уравнения движения центра тяжести корабля;

2) уравнения вращательного движения относительно центра тяжести.

Первую группу составляют уравнения:

$$
\left.\begin{aligned}
M\ddot{\xi}_0 &= \sum Q_\xi \\
M\ddot{\eta}_0 &= \sum Q_\eta \\
M\ddot{\zeta}_0 &= \sum Q_\zeta
\end{aligned}\right\} \qquad (4)
$$

где M — масса корабля; $\ddot{\xi}_0$, $\ddot{\eta}_0$, $\ddot{\zeta}_0$ — вторые производные по времени величин ξ_0, η_0, ζ_0; Q_ξ, Q_η, Q_ζ — проекции на оси $\Omega\xi$, $\Omega\eta$ и $\Omega\zeta$ сил, действующих на корабль.

Вторую группу составляют уравнения:

$$
\left.\begin{aligned}
A\dot{p} + (C - B)qr &= \sum M_x \\
B\dot{q} + (A - C)rp &= \sum M_y \\
C\dot{r} + (B - A)pq &= \sum M_z
\end{aligned}\right\} \qquad (5)
$$

где A, B, C — главные моменты инерции массы корабля относительно осей ox, oy, oz;

p, q, r — проекции угловой скорости на те же оси.

Правые части уравнений (5) суть суммы моментов всех сил, действующих на тело относительно осей ox, oy, oz.

Проекции угловой скорости на направления подвижных осей определяются зависимостями:

$$\left.\begin{aligned} p &= \dot{\psi}\sin\varphi\cos\theta + \dot{\theta}\cos\varphi \\ q &= \dot{\psi}\cos\varphi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\varphi \\ r &= \dot{\varphi} - \dot{\psi}\sin\theta \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Приведенные выше зависимости применимы при исследовании самого общего случая качки корабля. Практически большей частью приходится рассчитывать либо чисто боковую, либо килевую качку корабля, причем все зависимости получаются много проще. Поэтому в дальнейшем изложении формулы (1)—(6) не употребляются.

ГЛАВА I

РАСЧЕТ БОКОВОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ

§ 1. БОКОВАЯ КАЧКА КОРАБЛЯ НА ТИХОЙ ВОДЕ С МАЛОЙ АМПЛИТУДОЙ

Уравнение боковой качки корабля на тихой воде при малых амплитудах имеет вид:

$$(A + \Delta A)\ddot{\theta} + 2N\dot{\theta} + D(r - a)\theta = 0. \qquad (7)$$

Здесь A — момент инерции массы корабля ($m \cdot м \cdot$ сек.^{2}) относительно главной центральной продольной оси;

ΔA — момент инерции присоединенной массы воды ($m \cdot м \cdot$ сек.^{2}) относительно той же оси;

$2N$ — коэффициент момента сил сопротивления воды качке ($m \cdot м \cdot$ сек.) в предположении, что величина этого момента пропорциональна угловой скорости качки;

D — водоизмещение корабля, m;

$r - a$ — поперечная метацентрическая высота, $м$;

θ, $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ — переменный угол крена в радианах при качке и соответственно угловая скорость и угловое ее ускорение.

Уравнение (7) составлено в предположении, что углы крена лежат в пределах применимости метацентрической формулы остойчивости, что наклонения корабля равнообъемны и что сопротивление воды пропорционально первой степени угловой скорости качки. Кроме того, предполагается, что в начальный момент кораблю был придан наклон θ_0 и сообщена угловая скорость $\dot{\theta}_0$, после чего он был предоставлен самому себе.

Характер движения корабля определяется выражением:

$$\theta = e^{-ht}\left[\theta_0 \cos n_1 t + \frac{1}{n_1}(h\theta_0 + \dot{\theta}_0)\sin n_1 t\right], \qquad (8)$$

где e — основание натуральных логарифмов,

h — коэффициент сопротивления качке, сек.$^{-1}$

$$h = \frac{N}{A + \Delta A}, \qquad (9)$$

n_1 — частота качки с учетом сопротивления, сек.$^{-1}$

$$n_1 = \sqrt{n^2 - h^2}; \tag{10}$$

n — частота качки без учета сопротивления, сек.$^{-1}$

$$n = \sqrt{\frac{D(r-a)}{A+\Delta A}}. \tag{11}$$

Из уравнения (8) следует, что колебания судна являются периодическими и затухающими.

Наибольшее отклонение корабля от положения равновесия называется **амплитудой качки**. В случае затухающих колебаний амплитуда с каждым размахом уменьшается.

Для движения, выражаемого уравнением (8), амплитуда равна

$$\theta_m = e^{-ht_1}\sqrt{\theta_0^2 + \frac{1}{n_1^2}(h\theta_0 + \dot{\theta}_0)^2}, \tag{12}$$

где t_1 — моменты времени, при которых выражение (8) получает экстремальные значения.

Наличие в выражении для амплитуды члена e^{-ht_1} обусловливает уменьшение ее с течением времени, и, следовательно, затухание качки.

Отношение двух последовательных амплитуд равно

$$\frac{\theta_m}{\theta_{m+1}} = e^{hT}. \tag{13}$$

Величина hT называется логарифмическим декрементом

$$hT = \frac{1}{\lg e}\lg\frac{\theta_m}{\theta_{m+1}}. \tag{14}$$

Время, в течение которого корабль совершает одно полное колебание, или, иначе, промежуток времени между двумя последовательными наибольшими отклонениями на один и тот же борт, называется **периодом качки**.

При определении периода качки обычно пренебрегают практически ничтожным влиянием сопротивления воды. Величина периода в секундах определяется выражением:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{A+\Delta A}{D(r-a)}}. \tag{15}$$

Выражение (15) справедливо при условии применимости метацентрической формулы остойчивости, т. е. при положительной метацентрической высоте и достаточно малых амплитудах.

Для ориентировочной оценки периода боковой качки могут быть применены следующие приближенные формулы:

Формула Шиманского:

$$T_1 \cong 2\sqrt{\frac{1}{r-a}\left(\frac{B^2}{11{,}4}\alpha^2 + \frac{H^2}{12}\right)}. \tag{16}$$

Формула Дуайэра:

$$T_1 \cong 0{,}58 \sqrt{\frac{B^2 + 4z_g^2}{r - a}}. \qquad (17)$$

Для приближенного расчета периода боковой качки судов может служить также формула:

$$T_1 = C \frac{B}{\sqrt{r - a}},$$

где, по иностранным литературным данным, коэффициент C меняется в пределах $0{,}70 < C < 0{,}87$.

В среднем для военных судов приводятся значения

$$C \cong 0{,}71 \div 0{,}75 \text{ сек. } м^{-\frac{1}{2}}.$$

Для пассажирских судов

$$C \cong 0{,}80 \div 0{,}87 \text{ сек. } м^{-\frac{1}{2}}.$$

Для грузовых судов в полном грузу:

$$C \cong 0{,}81 \text{ сек. } м^{-\frac{1}{2}}.$$

Средние значения периода боковой качки некоторых классов кораблей приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Значения периодов боковой качки

Классы кораблей	Период боковой качки на тихой воде, сек.
Сторожевые корабли	4—6
Эскадренные миноносцы	7—9
Легкие крейсера	10—12
Линейные крейсера	13—15
Линейные корабли	14—18
Ледоколы	6—10
Пассажирские суда водоизм. 30—50 тыс. m	20—28
» » » 10—30 тыс. m	16—20
» » » 5—10 тыс. m	13—15
Грузовые суда	7—12
Рыболовные траулеры	6—8

§ 2. ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАССЫ КОРАБЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ

Величина момента инерции массы корабля относительно центральной продольной оси определяется общим выражением:

$$A = \int_M r^2\, dm = \int_M (y^2 + z^2)\, dm, \qquad (18)$$

где dm — элемент массы корабля;

$r = \sqrt{y^2 + z^2}$ — расстояние его от оси GX.

Для практического вычисления момента инерции может служить схема, разработанная инж. В. А. Махиным. Согласно этой схеме, вычисляемый момент инерции представлен формулой:

$$A = \frac{1}{g} \sum_{1}^{n} [(Z_g - Z_n)^2 + Y_n^2] P_n + \sum_{1}^{n} i_n, \qquad (19)$$

где A — момент инерции массы корабля относительно продольной оси, $m \cdot м \cdot$ сек.^{2};

g — ускорение силы тяжести, $м \cdot$ сек.$^{-2}$;

Z_g — возвышение ($м$) центра тяжести корабля над основной линией;

Z_n — возвышение ($м$) центра тяжести n-й статьи нагрузки над основной линией;

Y_n — отстояние ($м$) центра тяжести n-й статьи нагрузки от диаметральной плоскости корабля;

P_n — вес n-й статьи нагрузки, m;

i_n — собственный момент инерции массы n-й статьи нагрузки относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести n-й статьи, $m \cdot м \cdot$ сек.^{2}.

Выражение

$$\frac{1}{g} \sum_{1}^{n} [(Z_g - Z_n)^2 + Y_n^2] P_n$$

представляет собой сумму переносных моментов инерции массы отдельных статей нагрузки. Для ее вычисления используется постатейный расчет нагрузок корабля, из которого берутся величины P_n, Y_n, Z_n. В случае отсутствия плеч Y_n в расчете нагрузок они могут быть сняты непосредственно с чертежа.

Для определения собственных моментов инерции i_n делаются допущения: а) вес каждой отдельно взятой статьи нагрузки распределяется равномерно по проекции ее на плоскости миделя, б) площадь этой проекции есть прямоугольник шириной b_n и высотой h_n, где b_n и h_n — габаритные размеры n-й статьи нагрузок, снимаемые с чертежей общего расположения корабля.

При этих допущениях собственные моменты инерции статей нагрузки равны:

$$i_n = \frac{P_n}{12g} (b_n^2 + h_n^2). \qquad (20)$$

Способ вычисления моментов i_n неудобен для некоторых статей нагрузок, как, например, вес набора корпуса, наружной обшивки, настила палубы и др.

Для этих статей нагрузки могут быть рекомендованы следующие приближенные формулы.

Момент инерции наружной обшивки относительно продольной оси, проходящей через центр ее тяжести, будет:

$$i_0 = \frac{P_0}{g} \left\{ \frac{1}{3} \left[H^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right] - Z_0^2 \right\}. \qquad (21)$$

Здесь P_0 — вес обшивки корпуса;
H — высота борта корабля;
B — ширина корабля;
Z_0 — возвышение ЦТ обшивки над основной линией.

Собственный момент инерции обшивки бака может быть вычислен по приближенной формуле:

$$i_б = \frac{h_1^2 + B_1^2}{12} \frac{P_б}{g}. \tag{22}$$

Здесь h_1 — высота бака;
B_1 — наибольшая ширина бака;
$P_б$ — вес обшивки бака.

Собственный момент инерции массы настила палубы или платформы, предполагая вес ее равномерно распределенным по площади, может быть определен по формуле:

$$i_п = \frac{P_п}{3g} \frac{\sum\limits_0^L y^3}{\sum\limits_0^L y} \tag{23}$$

или более приближенно:

$$i_п = \frac{B^2 \alpha}{11,4} \frac{P_п}{g}, \tag{24}$$

где $P_п$ — вес палубы;
Y — ордината палубы по теоретическому чертежу;
B — ширина палубы;
α — коэффициент полноты площади палубы.

Собственный момент инерции массы бортовой брони определяется выражением:

$$i_{бр} = \frac{P_{бр}}{g} \left(\frac{\sum\limits_1^L y^2}{n} + \frac{h_2^2}{12} \right) \tag{25}$$

или более приближенно:

$$i_{бр} = \frac{P_{бр}}{g} \left[\left(\frac{B}{2} \right)^2 + \frac{h_2^2}{12} \right], \tag{26}$$

где $P_{бр}$ — вес бортовой брони;
h_2 — высота бортового пояса брони;
n — число равноотстоящих ординат по длине корабля в районе брони.

Расчет удобно производить в табличной форме по схеме, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Вычисление момента инерции массы корабля относительно продольной оси

№ по пор.	Наименование статей нагрузки	P_n, т	Z_n, м	$Z_g - Z_n$, м	Y_n, м	$(Z_g - Z_n)^2$, м²	Y_n^2, м²	VII + VIII, м²	IX · III, т · м²	h_n, м	b_n, м	h_n^2, м²	b_n^2, м²	$h_n^2 + b_n^2$, м²	$\frac{XV}{12}$, м²	III · XVI, т · м²	X + XVII, т · м²
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII

Более точно расчет момента инерции наружной обшивки может быть произведен по способу Ризбека. Для этой цели на чертеже корпуса из самой нижней точки диаметральной плоскости, как из центра, проводится ряд концентрических окружностей (рис. 3) с увеличивающимися на постоянную величину $\Delta\rho$ радиусами.

Заключенный между двумя соседними окружностями отрезок шпангоута *EF* рассматривается как прямая линия, на которой равномерно распределен вес, приходящийся на поверхность *ABCD*, выделенную двумя круговыми цилиндрами и двумя шпангоутами, взятыми по середине теоретических шпаций корабля. Площадь этой поверхности равна:

$$F = \frac{sl}{\cos\beta}, \tag{27}$$

где s — длина шпангоута между окружностями;

l — теоретическая шпация;

β — угол между диаметральной плоскостью и касательной к поверхности, проведенной в ее центре.

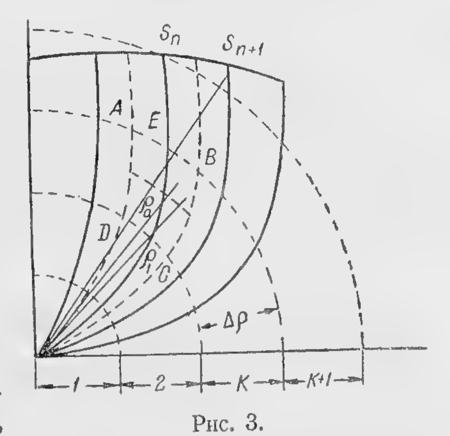


Рис. 3.

Момент инерции относительно оси, проходящей через центр окружностей, равен:

$$I_0 = \frac{l\,\Delta\rho^2}{3g}\sum_{k=1}^{k=n}(3k^2 - 3k + 1)\sum_L \frac{\gamma S}{\cos\beta}, \tag{28}$$

где суммирование по L производится по всей длине корабля для данной зоны между двумя соседними цилиндрическими поверхностями, а суммирование по k — по этим зонам.

Момент инерции относительно оси, проходящей через ЦТ веса корабля, равен:

$$A_k = I_0 - \frac{D}{g} Z_g^2. \tag{29}$$

Для ориентировочных расчетов момента инерции массы могут служить приближенные формулы.

1. Формула Ю. А. Шиманского, предполагающая, что корпус корабля представляет параболический цилиндр:

$$A = \frac{D}{g}\left(\frac{B^2\alpha^2}{11{,}4\,\delta} + \frac{H^2}{12}\right), \tag{30}$$

где α — коэффициент вертикальной полноты;
δ — коэффициент общей полноты.

2. Формула Г. Е. Павленко:

$$A = \frac{D}{16\,g}(B^2 + H^2). \tag{31}$$

3. Формула Дуайэра, предполагающая, что корпус корабля представляет прямоугольный параллелепипед шириной B, высотой $2Z_g$:

$$A = \frac{D}{12\,g}(B^2 + 4Z_g^2). \tag{32}$$

4. Эмпирическая формула для грузовых судов:

$$A_1 = \frac{D}{g}\rho^2, \tag{33}$$

где $\rho = 0{,}45\,B$.

Формула эта учитывает влияние присоединенной массы воды.

Для судна, подводная часть которого имеет форму эллипсоида, момент инерции присоединенной массы воды определяется формулой

$$\Delta A_1 = \frac{\mu_1}{38{,}2}\,\frac{\gamma}{g}\,LBT(B^2 + 4T^2), \tag{34}$$

где L, B, T — длина, ширина и осадка судна,
γ — объемный вес воды,
g — ускорение силы тяжести,
μ_1 — безразмерный коэффициент, определяемый по графику (рис. 4).

Для прямоугольного понтона с размерами L, B, T присоединенная масса равна

$$\Delta A_2 = \frac{\mu_2}{81{,}5}\,\frac{\gamma}{g}\,LB^4, \tag{35}$$

где коэффициент μ_2 определяется по графику (рис. 5).

Обычно момент инерции присоединенной массы воды для действительной формы судна имеет промежуточное значение между

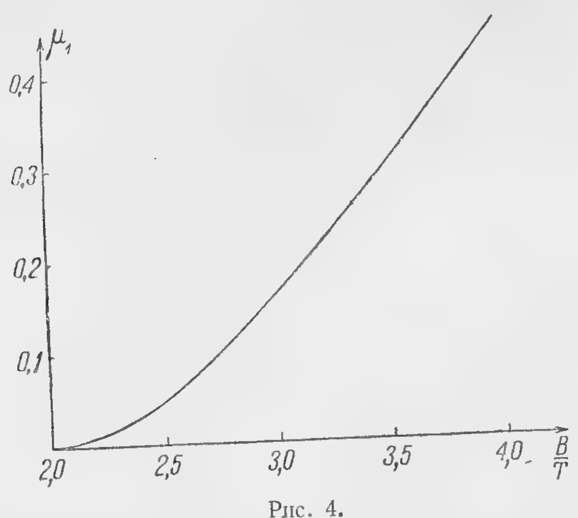


Рис. 4.

вычисляемыми по формулам (34) и (35). Поэтому его можно с практически достаточной точностью принимать равными среднему арифметическому из величин ΔA_1 и ΔA_2.

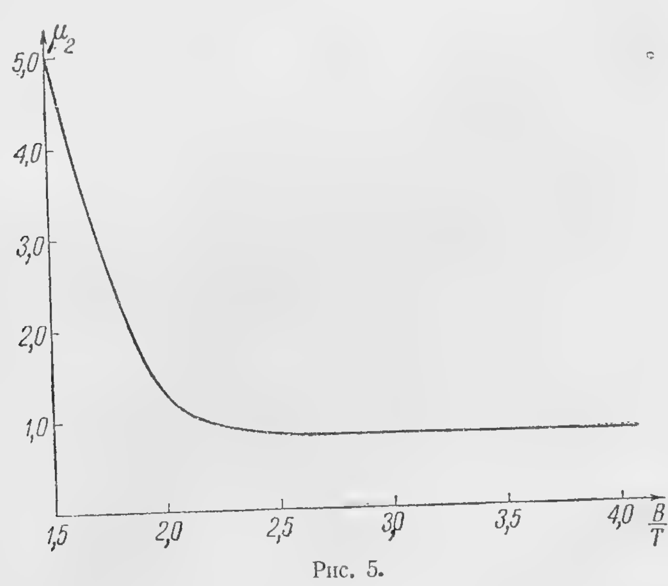


Рис. 5.

При еще более приближенных расчетах величина ΔA может быть определена по формуле:

$$\Delta A = \alpha_2 A, \tag{36}$$

где α_2 — отвлеченный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента общей полноты δ по графику рис. 6, полученному путем обработки экспериментальных данных.

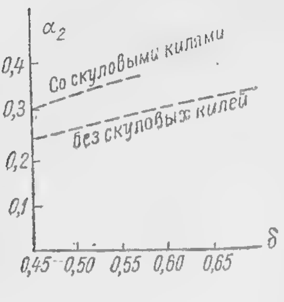


Рис. 6.

§ 3. СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ БОКОВОЙ КАЧКЕ СУДОВ

Величины моментов сил сопротивления боковой качке судов и характер зависимости их от угловой скорости качки точнее всего могут быть определены путем проведения испытаний боковой качки моделей судов. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, рекомендуется производить модельные испытания качки в бассейне. Моменты сил сопротивления качке могут быть также определены путем искусственного раскачивания близких по типу судов на тихой воде с последующей записью затухающей качки. Следует учитывать, однако, что при раскачивании натурных судов практически невозможно достичь больших амплитуд качки, и потому натурные наблюдения могут дать материал дяя определения сил сопротивления качки лишь приотносительно малых амплитудах.

Все эмпирические формулы, служащие для определения расчетным путем сопротивления качке, не обеспечивают необходимой точности и могут служить лишь для ориентировочных расчетов.

Произведенные наблюдения над затуханием боковой качки морских судов и их моделей показали, что зависимость момента сил сопротивления от угловой скорости качки достаточно близко может быть выражена двучленом вида:

$$M(\dot{\theta}) = 2N\dot{\theta} + K_1\dot{\theta}^2, \tag{37}$$

где $2N$ и K_1 — коэффициенты пропорциональности. Выражение это представляет значительные неудобства при интегрировании диференциального уравнения качки. Поэтому для ориентировочной оценки момента сил сопротивления можно применять распространенную эмпирическую формулу Бертена:

$$M(\dot{\theta}) = KA_1\dot{\theta}^2, \tag{38}$$

где

$$K = \frac{kLB^4}{A_1}; \tag{39}$$

здесь L и B — длина и ширина судна по грузовой;

k — эмпирический коэффициент; для судов с незначительными выступающими частями и закругленными скулами $k = 0{,}001$, а для судов с небольшим килем и острыми скуловыми образованиями $k = 0{,}002$ $m \cdot м^{-4} \cdot$ сек.^{2}.

Если судно имеет боковые кили общей площадью s в расстоянии d от ЦТ G судна, величина коэффициента K может быть определена по эмпирической формуле

$$K = \frac{1}{A_1}(kLB^4 + 0{,}4sd^3). \qquad (40)$$

Квадратичная зависимость от угловой скорости качки может быть заменена приближенной линейной зависимостью, полученной на основе соображений о равенстве работ сил сопротивления на отклонении θ_m по квадратичному и линейному закону:

$$M(\dot{\theta}) = 0{,}85\ KA_1\sigma\theta_m\dot{\theta}, \qquad (41)$$

где σ — частота качки с амплитудой θ_m.

В этом случае коэффициент пропорциональности при первой степени угловой скорости качки в выражении момента сил сопротивления равен:

$$2N = 0{,}85\ KA_1\sigma\theta_m. \qquad (42)$$

Относительный безразмерный коэффициент сопротивления равен:

$$2\mu = \frac{2N}{nA_1} = 0{,}85\ Kx\theta_m, \qquad (43)$$

где через x обозначено отношение частоты σ качки к частоте ее n на тихой воде.

Для вычисления коэффициента сил сопротивления качке различными авторами предлагались также следующие формулы.

1. Формула Н. А. Николаева для относительного коэффициента линейного сопротивления при отсутствии хода корабля:

$$2\mu = \frac{2N}{A_1 n} = k_1 \frac{LB^4}{D(B^2 + H^2)}\theta_m, \qquad (44)$$

где 2μ — относительный коэффициент сопротивления $\left(\mu = \frac{h}{n}\right)$;

k_1 — коэффициент, равный для обычных судов около 0,055—0,060;

θ_m — амплитуда качки в радианах, которую можно принимать в среднем равной 0,5—0,6;

D, L, B, H — водоизмещение, длина, ширина, высота борта корабля.

2. Формула В. В. Шулейкина, согласно которой коэффициент линейного сопротивления качке при отсутствии хода корабля равен

$$2N = \frac{2A_1}{T_1}\ \ln\left[1 + K_1\frac{B^2 + T^2}{\rho^2} + K_2 T_1\right], \qquad (45а)$$

где коэффициенты K_1 и K_2 могут быть рассчитаны по формулам, предложенным С. П. Левченко:

$$K_1 = \frac{\pi}{2}\ \frac{1}{VL(B^2 + T^2)}\left(\frac{q_1}{\theta_m}\right)^2; \qquad (45б)$$

$$K_2 = kd^2\,\Omega. \qquad (45в)$$

Здесь V, L, B, T — водоизмещение, длина, ширина и осадка корабля;

T_1 — период боковой качки судна;

ρ — радиус инерции;

Ω — смоченная поверхность, d — среднее плечо ее;

q_1 — объем вытесняемого корпусом водяного клина при наклонении судна на угол θ_m. Согласно расчетам С. П. Левченко отношение $\frac{q_1}{\theta_m}$ при небольших θ_m для данного судна постоянно и может быть вычислено по теоретическому чертежу;

k — коэффициент рения, величина которого может быть установлена путем эксперимента.

3. По материалам Г. Е. Павленко величина коэффициента сил сопротивления без хода равна:

$$2N = 2\mu \sqrt{D(r-a)A_1}. \tag{46}$$

Здесь $2\mu = 0{,}05 \div 0{,}10$; $A_1 = A + \Delta A$.

4. По материалам Г. А. Фирсова, относительный коэффициент $2\mu = 0{,}07 \div 0{,}10$ — для судов, не снабженных скуловыми килями, и $2\mu = 0{,}11 \div 0{,}14$ — для судов со скуловыми килями.

При ходе судна сопротивление качке увеличивается. Возрастание коэффициента линейного сопротивления может быть ориентировочно оценено с помощью графика рис. 7, форма которого предложена М. Е. Мазором. По оси абсцисс этого графика отложены числа Фруда $F = \frac{v}{\sqrt{gL}}$, а по оси ординат величины $\frac{N_v - N_0}{N_0}$, где N_v — коэффициент сопротивления качке при ходе со скоростью v, N_0, — коэффициент сопротивления при отсутствии хода. Приведенная на рис. 7 кривая получена путем обработки результатов иностранных опытов над моделями двух гражданских судов.

Рис. 7.

Приведенные формулы мало согласуются между собой, но в настоящее время нет оснований для определенного предпочтения той или иной из них, как наиболее достоверной. По соображениям унификации и удобства сопоставления результатов расчетов качки, все же целесообразно впредь до получения более точных зависимостей временно остановиться на определенной расчетной методике. С этой точки зрения можно рекомендовать при расчетах сопротивления боковой качке корабля на стоянке применение формул 38—43 с корректировкой их для идущего корабля по графику рис. 7.

§ 4. СВЕДЕНИЯ О ВОЛНАХ

Для расчета качки корабля на волнении необходимо располагать данными о длине, высоте, периоде и крутизне действующих на корабль волн. При этом предполагается обычно, что волны цилиндричны, правильны и имеют синусоидальный или реже трохоидальный профиль. В действительности такой характер волнения наблюдается сравнительно редко и обычно волны бывают неправильны и нецилиндричны.

Трохоидальные волны характеризуются следующими общими уравнениями:

$$\xi - a = re^{-\frac{2\pi c}{\lambda}} \sin 2\pi\left(\frac{a}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right), \tag{47}$$

$$\zeta - c = re^{-\frac{2\pi c}{\lambda}} \cos 2\pi\left(\frac{a}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right), \tag{48}$$

$$p - p_0 = \rho g\left[c - \frac{\pi}{\lambda} r^2\left(1 - e^{-\frac{4\pi c}{\lambda}}\right)\right], \tag{49}$$

где r — радиус орбиты, описываемой частицами свободной поверхности воды, равный половине высоты волны;

λ — длина волны;

τ — период волны;

ρ — плотность воды;

a и c — координаты центра орбиты частицы, являющиеся координатами ее в положении покоя;

ξ и ζ — координаты частицы (a, c) в момент t;

g — ускорение силы тяжести;

p_0 — атмосферное давление;

p — давление в том слое жидкости, начальное положение которого определялось координатой c.

Уравнение свободной поверхности воды в момент t может быть написано в следующем виде (полученном акад. А. Н. Крыловым):

$$\zeta_{\text{в}} = \frac{\pi r^2}{\lambda} + r\cos 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right) - \frac{\pi r^2}{\lambda}\cos 4\pi\left(\frac{\xi}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right) + \ldots \tag{50}$$

Ординаты трохоиды в тысячных долях r при различных $\frac{2r}{\lambda}$ приведены в табл. 3, составленной И. А. Яковлевым.

Период волны и скорость ее движения связаны следующими зависимостями с длиной волны:

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{g}\lambda} \cong 0{,}8\sqrt{\lambda}; \tag{51}$$

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}\lambda} \cong 1{,}25\sqrt{\lambda}. \tag{52}$$

Обычно в расчетах качки для упрощения полагают, что волна имеет синусоидальный профиль, определяемый уравнением

$$\zeta_{\text{в}} = r\cos 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right). \tag{53}$$

Таблица 3

Ординаты профиля трохоидальной волны в тысячных долях полувысоты волны

Абсциссы в долях λ [1]	Отношение высоты волны к длине												№ ординат судна на	
	1 : 8	1 : 10	1 : 12	1 : 14	1 : 16	1 : 18	1 : 20	1 : 22	1 : 24	1 : 26	1 : 28	1 : 30	вершине волны	подошве волны
0 [1]	1,000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	10	0—20
∓ 0,05	876	900	912	920	926	930	932	934	936	938	939	940	9—11	1—19
∓ 0,10	583	646	684	706	722	734	743	750	756	760	764	768	8—12	2—18
∓ 0,15	245	326	374	410	438	456	470	482	492	500	508	514	7—13	3—17
∓ 0,20	—078	000	050	090	118	140	158	171	182	192	202	210	6—14	4—16
∓ 0,25	—359	—300	—252	—218	—192	—172	—154	—140	—130	—120	—112	—106	5—15	5—15
∓ 0,30	—590	—544	—512	—486	—466	—452	—440	—430	—420	—412	—404	—398	4—16	6—14
∓ 0,35	—770	—744	—722	—706	—696	—686	—677	—670	—664	—658	—652	—648	3—17	7—13
∓ 0,40	—898	—888	—878	—869	—863	—858	—854	—850	—846	—844	—842	—840	2—18	8—12
∓ 0,45	—974	—971	—969	—967	—966	—965	—964	—963	—962	—961	—960	—960	1—19	9—11
∓ 0,50	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	—1000	0—20	0

[1] Нулевая абсцисса совпадает с вершиной волны.

Угол волнового склона при синусоидальной волне изменяется в точке $\xi = 0$ по уравнению:

$$\alpha = \left|\frac{\partial \zeta_в}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} = \alpha_0 \sin \frac{2\pi t}{\tau}, \qquad (54)$$

где α_0 — наибольший угол волнового склона поверхности волны, равный:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi r}{\lambda}. \qquad (55)$$

Размеры волн зависят от многочисленных факторов — от силы, продолжительности действия и постоянства направления ветра, от

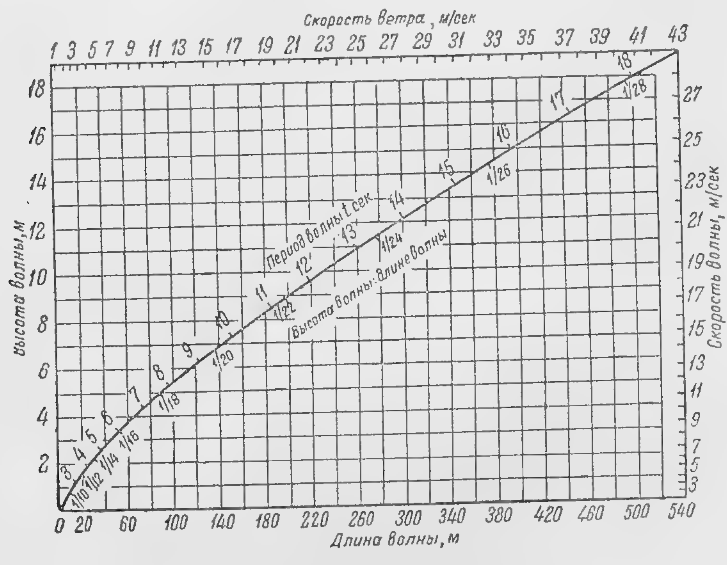


Рис. 8.

площади поверхности моря, конфигурации берегов его и т. д. Волны могут иметь место и при отсутствии ветра в том случае, если они возникли в результате распространения волнения из отдаленной области моря, охваченной штормом.

Величину волнения принято характеризовать посредством девятибальной шкалы состояния моря, принятой Гидрографическим Управлением и приведенной в табл. 4.

Согласно девятибальной шкале, степень волнения определяется одной лишь высотой волн в метрах. На практике часто оценку волнения производят по силе вызвавшего его ветра. При этом получается, что для разных морей и даже отдельных участков их элементы волн при одинаковой силе ветра оказываются различными. В результате для каждого морского бассейна существует своя

Таблица 4

Шкала состояния моря

Баллы волнения	Высота волны (для открытого моря) м	Ветер в баллах шкалы Бофорта	Степень волнения	Признаки для определения степени волнения
0	0	0	Совершенно спокойное море	Зеркально гладкое море
1	0,25	1	Спокойное море	Рябь, небольшие чешуеобразные волны без пены
2	0,25— 0,50	2—3	Слабое волнение	Короткие волны, гребни, опрокидываясь, образуют стекловидную пену
3	0,50— 0,75	4	Легкое волнение	Волны удлиненные, местами видны барашки
4	0,75— 1,25	5	Умеренное волнение	Волны хорошо развиты, повсюду белые барашки
5	1,25— 2,0	6	Неспокойное море	Начало образования крупной волны, белые пенистые гребни занимают значительные площади
6	2,0 — 3,0	7	Крупное волнение	Волны громоздятся, срываемая с гребней пена ложится полосами по ветру
7	3,0 — 5,0	8—9	Сильное волнение	Высота и длина волн заметно увеличены; полосы пены ложатся тесными рядами по направлению ветра
8	5,0 —10,0	10	Жестокое волнение	Высокие гороподобные волны с длинными ломающимися гребнями. Пена широкими плотными полосами ложится по ветру. Поверхность моря от пены становится белой
9	—	11—12	Исключительное волнение	Высота волн настолько велика, что суда временами скрываются из вида. Море в направлении ветра покрыто пеной. Ветер, срывая гребни, несет водяную пыль, уменьшающую видимость

местная шкала состояния моря и одинаковому баллу волнения соответствуют разные значения высоты волн.

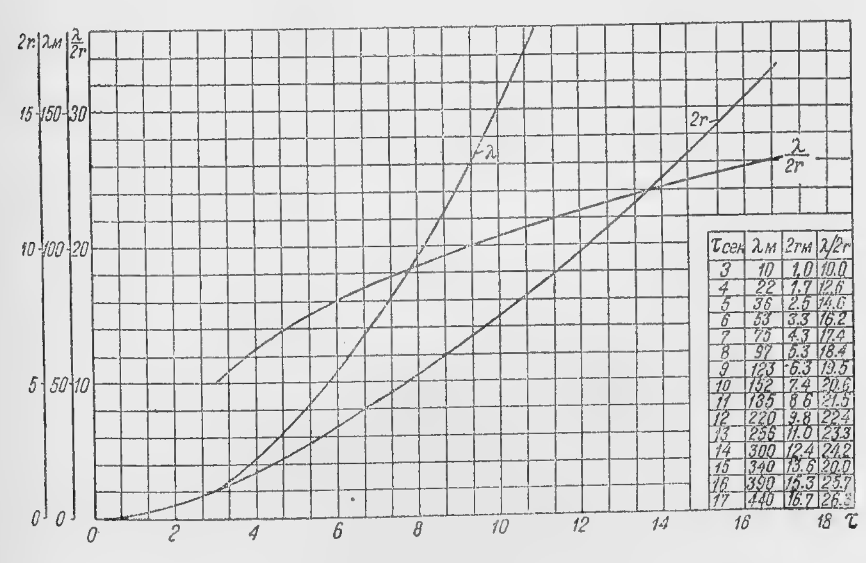
Силу ветра принято оценивать баллами по шкале Бофорта, приведенной в разделе „Статика корабля“ (§ 83, табл. 95).

Элементы волн, т. е. их наибольшая длина, высота и период, в разных морях бывают различны и определяются посредством наблюдений. В результате обработки ряда наблюдений различными авторами были предложены эмпирические формулы, связывающие элементы волн.

По материалам Циммермана, высота развившейся волны открытого моря связана с длиной ее следующей зависимостью:

$$2r = 0{,}17\lambda^{3/4}. \qquad (56)$$

Результаты обработки Циммерманом ряда наблюдений представлены в виде графика на рис. 8.



τ сек	λ м	2r м	λ/2r
3	10	1.0	10.0
4	22	1.7	12.6
5	36	2.5	14.6
6	53	3.3	16.2
7	75	4.3	17.4
8	97	5.3	18.4
9	123	6.3	19.5
10	152	7.4	20.6
11	185	8.6	21.5
12	220	9.8	22.4
13	256	11.0	23.3
14	300	12.4	24.2
15	340	13.6	25.0
16	390	15.3	25.7
17	440	16.7	26.3

Рис. 9.

Зависимость элементов волн от их периода графически представлена на рис. 9. По оси абсцисс этого графика отложены значения периода волн в секундах, а по оси ординат длины λ волн, их высоты $2r$ и отношения $\frac{\lambda}{2r}$. Соотношение между баллами волнения и элементами волн показано на графике, предложенном Л. Ф. Титовым (рис. 10). По оси абсцисс графика отложены длины волн, а по оси ординат их высоты. На графике показан пунктирный сектор, разделенный штрихованными полосами на зоны, соответствующие различным баллам волнения, отмеченным на рисунке римскими цифрами.

В начале действия ветра преобладающее число волн будет группироваться у левого края соответствующей зоны пунктирного сектора. По мере развития волнения разнообразие волн будет продолжать расти и по своим размерам они будут охватывать все большую ширину данной зоны, группируясь в дальнейшем около правого края сектора. Соотношения между элементами волн и различными баллами волнения не применимы на мелководье — рифах, банках и в прибойной зоне у берегов, а также при очень неправильном волнении — толчее.

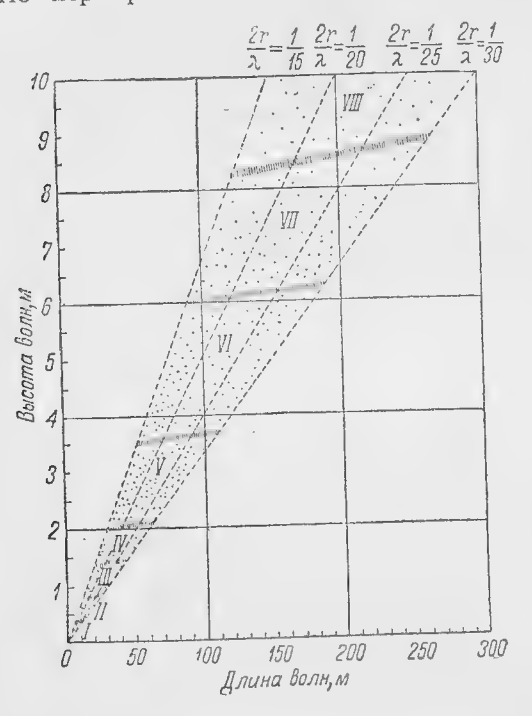


Рис. 10.

В табл. 5 приведены элементы волн по сведениям, собранным В. В. Давыдовым для различных морей, а П. О. Зандиным для озер и устьев рек.

С убыванием глубины бассейна высота волн увеличивается, причем это увеличение высоты на малых глубинах приблизительно пропорционально корню четвертой степени из глубины

$$2r_1 = 2r\sqrt[4]{\frac{p}{p_1}}, \tag{57}$$

где p — начальная глубина бассейна;

$2r$ — начальная высота волны;

p_1 — новая глубина.

Убывание длины волны с уменьшением глубины бассейна совершается по закону:

$$\lambda = \tau\sqrt{pg}. \tag{58}$$

Для ориентировочной оценки влияния размеров площади бассейна на максимальную высоту волн может служить эмпирическая формула:

$$2r_{max} = 1{,}5\sqrt{D} + (2{,}5 - \sqrt[4]{D}), \tag{59}$$

где D — длина водного бассейна в направлении распространения волн.

По эмпирическим интерполяционным формулам П. О. Зандина, элементы волн озер и озеровидных бьефов равны:

$$\left.\begin{aligned} 2r &= 0{,}42\sqrt{p} \\ \lambda &= 0{,}42\,p + 2{,}65\sqrt{p} \end{aligned}\right\} \qquad (60)$$

где p — средняя глубина бассейна.

Таблица 5

Элементы волн в различных бассейнах

Наименование бассейна	Высота волны $2r$, м	Наименьшая длина, соответствующая высоте $2r$ λ, м	Скорость по формуле $v = 1{,}25\sqrt{\lambda}$, м/сек.
Белое море	3	43	8,2
Балтийское море	3	43	8,2
Финский залив	2,5	35	7,4
Северное (Немецкое) море	5	85	11,5
Средиземное море	4,5	74	10,8
Черное море	3	43	8,2
Каспийское море	3	43	8,2
Атлантический, Индийский и Великий океаны с IV по X мес.	8	162	15.9
То же с XI по III мес.	12,0	270	20,6
Японское море	5	85	11,5
Охотское море	6	109	13,0
Низовья больших рек:			
Волга, Днепр, С. Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена, Амур в половодье	1,5	15	—
Ладожское озеро	3,0	40	—

§ 5. РАСЧЕТ ВЫНУЖДЕННЫХ АМПЛИТУД БОКОВОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ НА ВОЛНЕНИИ

При положении корабля лагом к волне он испытывает вертикальную и бортовую качку. Уравнение вертикальной качки корабля на волнении может быть написано в виде:

$$\frac{D}{g}\ddot{\zeta} = -\gamma S(\zeta - \zeta_в) - 2N_1(\dot{\zeta} - \dot{\zeta}_в) - \Delta M(\ddot{\zeta} - \ddot{\zeta}_в), \qquad (61)$$

где ζ, $\dot{\zeta}$, $\ddot{\zeta}$ — мгновенная координата ЦТ корабля и ее производные по времени;

S — площадь грузовой ватерлинии;

$2N_1$ — коэффициент сопротивления вертикальной качке, определяемый согласно указаниям § 13;

ΔM — присоединенная масса воды при вертикальной качке, определяемая согласно указаниям § 12;

D — весовое водоизмещение корабля;

γ — объемный вес воды;

g — ускорение силы тяжести;

$\zeta_в, \dot{\zeta}_в, \ddot{\zeta}_в$ — мгновенная ордината эффективного волнового профиля и ее производные по времени. Величина $\zeta_в$ должна быть задана и определяется выражением:

$$\zeta_в = \varkappa_\zeta r_0 \cos \sigma t; \tag{62}$$

здесь $\varkappa_\zeta r_0 = r_m$ — эффективный радиус орбиты волны (§ 6);

$\sigma = \frac{2\pi}{\tau}$ — частота волны.

Уравнение боковой качки может быть написано аналогично:

$$A\ddot{\theta} = -D(r-a)(\theta-\alpha) - 2N(\dot{\theta}-\dot{\alpha}) - \Delta A(\ddot{\theta}-\ddot{\alpha}), \tag{63}$$

где $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ — мгновенный угол крена корабля и его производные по времени;

$r - a$ — поперечная метацентрическая высота;

$2N$ — коэффициент сопротивления качке, определяемый согласно указаниям § 3;

A — момент инерции массы корабля относительно центральной продольной оси;

ΔA — момент инерции присоединенной массы воды при бортовой качке;

$\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ — мгновенный эффективный угол волнового склона и его производные по времени:

$$\alpha = \varkappa_\theta \alpha_0 \sin \sigma t; \tag{64}$$

здесь $\varkappa_\theta \alpha_0 = \alpha_m$ — наибольший эффективный угол волнового склона [§ 6 и формула (55)].

Решение уравнений (61) и (63), а следовательно, и расчет качки может производиться в относительных и абсолютных координатах. При решении уравнения (63) в относительных координатах за искомую неизвестную принимают:

$$\varphi = \theta - \alpha, \tag{65}$$

представляющую переменный во времени угол между диаметральной плоскостью корабля и плоскостью, нормальной к волне (рис. 11).

Вычитанием из обеих частей уравнения (63) члена $A\ddot{\alpha}$, оно приводится к виду:

$$(A + \Delta A)\ddot{\varphi} + 2N\dot{\varphi} + D(r-a)\varphi = A\alpha_m\sigma^2 \sin \sigma t. \tag{66}$$

В дальнейшем вводятся обозначения:

$n=\frac{2\pi}{T}=\sqrt{\frac{D(r-a)}{A+\Delta A}}$ — частота боковой качки на тихой воде, сек.$^{-1}$;

$h=\frac{N}{A+\Delta A}$ — коэффициент сопротивления боковой качке, сек.$^{-1}$;

$q=\frac{\Delta A}{A+\Delta A}$ — отвлеченный коэффициент;

$x=\frac{\sigma}{n}=\frac{T}{\tau}$ — отношение периода собственных колебаний судна к периоду возмущающей силы;

$\mu=\frac{h}{n}$ — относительный безразмерный коэффициент сопротивления.

Разделением коэффициентов уравнения (66) на величину полного момента инерции $A+\Delta A$ оно приводится к виду:

$$\ddot{\varphi}+2h\dot{\varphi}+n^2\varphi=(1-q)\,\alpha_m\sigma^2\sin\sigma t. \qquad (67)$$

Вынужденные относительные колебания определяются частным решением уравнения (67)

$$\varphi=\varphi_m\sin(\sigma t-\delta). \qquad (68)$$

Амплитуда вынужденных колебаний равна:

$$\varphi_m=\frac{\alpha_m(1-q)\,x^2}{\sqrt{(1-x^2)^2+4\mu^2x^2}}. \qquad (69)$$

Отставание по фазе относительного отклонения от возмущающей силы определяется формулой:

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{2\mu x}{1-x^2}. \qquad (70)$$

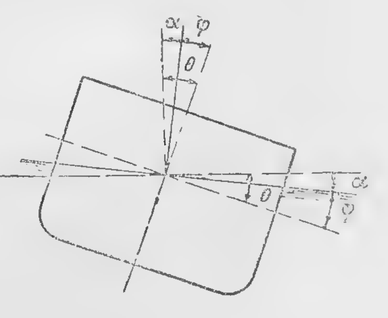


Рис. 11.

Выражение φ_m принимает наибольшие значения в области резонанса, т. е. при отношении $x=\frac{T}{\tau}$, близком к единице.

Выражение (68) определяет лишь частное решение уравнения (66). Полное же решение учитывает также свободные колебания и имеет вид:

$$\varphi=(C_1\cos n_1t+C_2\sin n_1t)\,e^{-ht}+\varphi_m\sin(\sigma t-\delta). \qquad (71)$$

Здесь постоянные C_1 и C_2 зависят от начальных условий, т. е. от относительного начального наклонения и относительной начальной скорости (при $t=0$);

e — основание натуральных логарифмов;

n_1 — частота свободных колебаний, определяемая формулой (10).

При решении уравнения (63) в абсолютных координатах за искомую неизвестную принимается переменный во времени угол крена θ корабля. Диференциальное уравнение (63) путем несложных преобразований может быть приведено к виду:

$$\ddot{\theta} + 2h\dot{\theta} + n^2\theta = \alpha_m n^2 \sqrt{(1 - qx^2)^2 + 4\mu^2 x^2} \sin(\sigma t + \beta), \quad (72)$$

где β — отставание фазы суммарной возмущающей силы от фазы волнового склона; прочие обозначения те же, как и для уравнения (66);

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2\mu x}{1 - qx^2}. \quad (73)$$

Вынужденные абсолютные колебания определяются частным решением уравнений (72):

$$\theta = \theta_m \sin(\sigma t + \beta - \delta), \quad (74)$$

где θ_m — амплитуда вынужденных колебаний.

$$\theta_m = \alpha_m \sqrt{\frac{(1 - qx^2)^2 + 4\mu^2 x^2}{(1 - x^2)^2 + 4\mu^2 x^2}}. \quad (75)$$

Величина θ_m принимает наибольшие значения в области резонанса, т. е. при $x = \frac{T}{\tau}$, близком к единице, фаза δ определяется зависимостью (70).

Выражение (75) представляет собой лишь частное решение, полное же решение учитывает также свободные колебания и имеет вид:

$$\theta = (C_1 \cos n_1 t + C_2 \sin n_1 t)\, e^{-ht} + \theta_m \sin(\sigma t + \beta - \delta). \quad (76)$$

Здесь постоянные C_1 и C_2 зависят от начальных условий;

e — основание натуральных логарифмов;

n_1 — частота свободных колебаний.

$$n_1 = \sqrt{n^2 - h^2}. \quad (77)$$

Так как обычно h мало по сравнению с n, то

$$n_1 \cong n.$$

Согласно выражению (76) или (71) бортовая качка корабля является результатом наложения двух видов колебаний: свободных и вынужденных. Амплитуда свободных колебаний в случае правильного установившегося волнения уменьшается с течением времени, амплитуда же вынужденных остается постоянной. Поэтому при качке судна на правильном установившемся волнении свободные колебания с течением времени затухают и качка корабля определяется одними лишь вынужденными колебаниями.

Если, однако, волны не являются вполне правильными и периоды отдельных волн несколько отличаются друг от друга, то, как показал акад. А. Н. Крылов, свободные колебания не затухают, а продолжают существовать вместе с вынужденными, и амплитуды их могут быть

величинами того же порядка и даже большими, чем амплитуды последних. В результате качка корабля приобретает неправильный характер, не поддающийся учету, и суммарные отклонения корабля могут превосходить определяемые формулой (69) или (75).

Следует иметь в виду, однако, что последнее справедливо лишь в том случае, если режим качки далек от условий резонанса, т. е. x значительно больше или меньше единицы. Чем ближе качка к условиям резонанса, тем менее возможностей для превышения суммарными отклонениями амплитуды вынужденных колебаний в результате неблагоприятного наложения свободных колебаний. Условия чистого резонанса на правильной волне при $x = 1$ являются практически наиболее оптимальными для развития максимально интенсивных колебаний, амплитуда которых определяется выражением:

$$\theta_{mm} = \alpha_m \frac{\sqrt{(1-q)^2 + 4\mu^2}}{2\mu} \tag{78}$$

или же

$$\varphi_{mm} = \frac{\alpha_m (1-q)}{2\mu} . \tag{79}$$

Следовательно, влияние неправильности волнения может привести лишь к уменьшению наибольших отклонений по сравнению с выражением (78) или (79), но не к возрастанию их. Поэтому выражения (78) и (79) практически можно рассматривать как предел возможных амплитуд качки при волнах данной крутизны, если только прочие условия качки соответствуют допущениям, принятым при составлении уравнения (63).

Решение уравнения (61) вертикальной качки также может быть получено в относительных и абсолютных координатах. При решении уравнения (61) в относительных координатах за искомую неизвестную принимается:

$$z = \zeta - \zeta_в , \tag{80}$$

представляющую изменение возвышения центра тяжести корабля над переменным во времени возвышением уровня воды. Вычитанием из обеих частей уравнения (61) члена $\frac{D}{g}\ddot{\zeta}_в$ оно приводится к виду:

$$\left(\frac{D}{g} + \Delta M\right)\ddot{z} + 2N_1\dot{z} + \gamma S z = \frac{D}{g} \varkappa_\zeta r_0 \sigma^2 \cos \sigma t. \tag{81}$$

В дальнейшем вводятся обозначения, аналогичные принятым при расчете бортовой качки:

$\omega = \frac{2\pi}{T_1} = \sqrt{\frac{\gamma S}{\frac{D}{g} + \Delta M}}$ — частота вертикальной качки на тихой воде, сек.$^{-1}$;

$h_1 = \frac{N_1}{\left(\frac{D}{g} + \Delta M\right)}$ — коэффициент сопротивления вертикальной качке, сек.$^{-1}$;

$q_1 = \dfrac{\Delta M}{\dfrac{D}{g} + \Delta M}$ — отвлеченный коэффициент;

$x_1 = \dfrac{\sigma}{\omega} = \dfrac{T_1}{\tau}$ — отношение периода вертикальной качки судна на тихой воде к периоду возмущающей силы;

$\mu_1 = \dfrac{h_1}{\omega}$ — относительный безразмерный коэффициент сопротивления.

Вынужденные относительные колебания определяются выражением:

$$z = Z_m \cos(\sigma t - \delta_1), \tag{82}$$

где амплитуда колебаний Z_m равна:

$$Z_m = \frac{\varkappa_\zeta r_0 (1 - q_1) x_1^2}{\sqrt{(1 - x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}}. \tag{83}$$

Фазовый угол δ_1

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{2\mu_1 x_1}{1 - x_1^2}. \tag{84}$$

Вынужденные абсолютные колебания определяются выражением:

$$\zeta = \zeta_m \cos(\sigma t + \beta_1 - \delta_1), \tag{85}$$

где

$$\zeta_m = \varkappa_\zeta r_0 \sqrt{\frac{(1 - q_1 x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}{(1 - x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}}, \tag{86}$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{2\mu_1 x_1}{1 - q_1 x_1^2}, \tag{87}$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{2\mu_1 x_1}{1 - x_1^2}. \tag{88}$$

Затухание свободных колебаний при вертикальной качке происходит более интенсивно, нежели при бортовой, и потому влияние их на суммарную амплитуду вертикальной качки незначительно. Периоды вертикальной и боковой качки на тихой воде для большинства судов различны. Поэтому условия резонанса при бортовой качке обычно бывают далеки от резонанса с вертикальной качкой, и наоборот.

В случае, если коэффициент сопротивления качке определяется путем пересчета от квадратичного или иного закона к линейному, расчет можно вести методом последовательных приближений. Сначала задаются ожидаемой амплитудой качки θ_m' (или φ_m') и, подставляя ее вместо θ_m в выражения (43) или (44), определяют коэффициент

сопротивления качке. Далее, по выражению (69) или (75) определяют амплитуду θ''_m (или φ''_m) качки. Если рассчитанная амплитуда окажется близкой к θ'_m, то расчет на этом заканчивается. В противном случае следует задаться новым значением амплитуды, обычно средним между θ'_m и θ''_m, и повторить расчет.

Определение амплитуд качки при наличии квадратичного сопротивления может быть также выполнено в замкнутом виде по предложенным Г. А. Фирсовым формулам. Для этого в выражение (75) следует подставить значение 2μ по выражению (43). После возведения в квадрат обеих частей полученного равенства и выполнения несложных преобразований, оно приводится к биквадратному уравнению относительно искомой величины амплитуды θ_m.

$$\theta_m^4 - 2P\theta_m^2 - Q = 0, \tag{89}$$

где

$$P = \frac{1}{2}\left[\alpha_m^2 - \frac{\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^2}{B^2}\right], \tag{90}$$

$$Q = \alpha_m^2 \frac{\left(q - \frac{1}{x^2}\right)^2}{B^2}, \tag{91}$$

$$B = 0{,}85K. \tag{92}$$

Решая уравнение (89) относительно θ_m, имеем:

$$\theta_m^2 = P + \sqrt{P^2 + Q}. \tag{93}$$

Аналогичным способом может быть получено непосредственное решение задачи и при любом ином степенном законе сопротивления, если только могут быть найдены корни соответствующих алгебраических уравнений.

Если качка рассчитывается для условий резонанса и если за основу принимается квадратичный закон сопротивления вида

$$M(\dot{\varphi}) = KA_1\dot{\varphi}^2, \tag{94}$$

где A_1 — момент инерции массы корабля и присоединенной массы воды;

K — безразмерный коэффициент,

то относительная амплитуда качки может быть определена по формуле:

$$\varphi_m = \sqrt{\frac{3\pi}{8}\frac{\alpha_m}{K}\frac{A}{A+\Delta A}} \cong 1{,}085\sqrt{\frac{\alpha_m}{K}\frac{A}{A+\Delta A}}. \tag{95}$$

Амплитуда качки в абсолютных координатах в этом случае равна:

$$\theta_m = \sqrt{\varphi_m^2 + \alpha_m^2} \cong \varphi_m, \tag{96}$$

так как в условиях резонанса α_m обычно мало по сравнению с φ_m.

§ 6. ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ КОРАБЛЯ НА АМПЛИТУДУ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СИЛЫ ПРИ БОКОВОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКЕ

Амплитуда возмущающей силы при вертикальной качке корабля, расположенного лагом к волне, определяется величиной эффективного радиуса орбиты волны:

$$r_m = \varkappa_\zeta r_0, \tag{97}$$

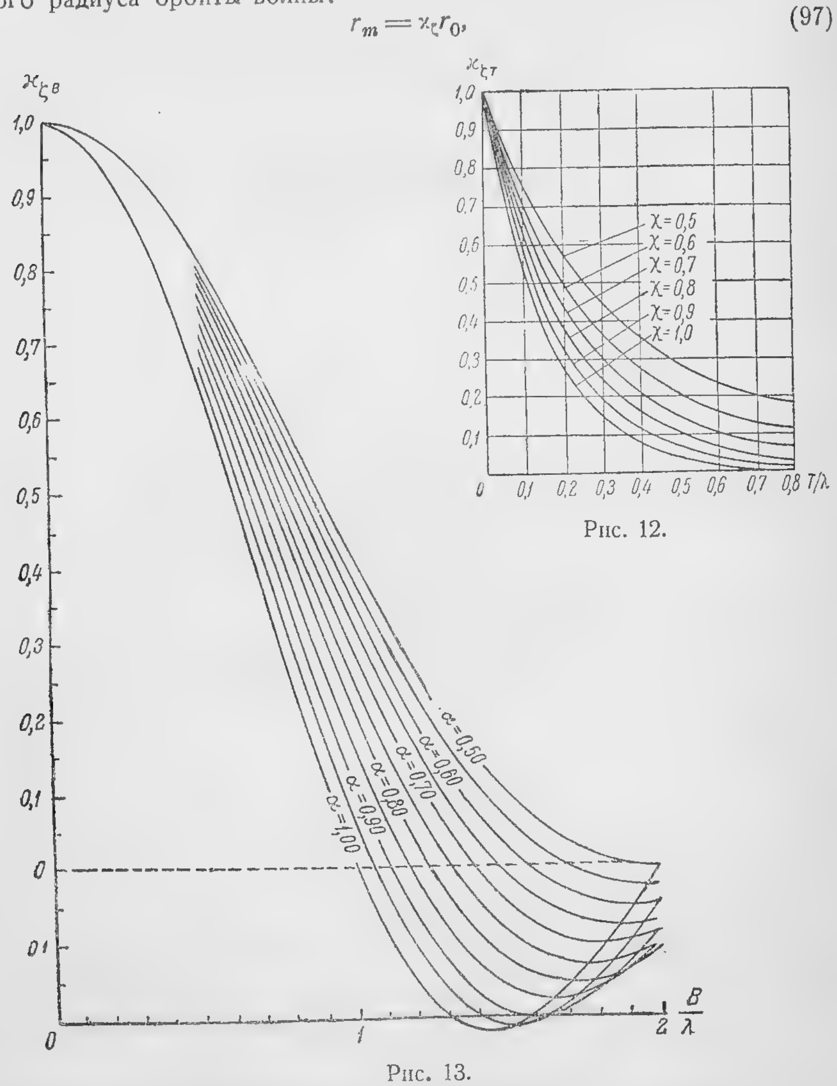


Рис. 12.

Рис. 13.

где r_0 — радиус орбиты, описываемой частицами воды на поверхности волны, равный половине высоты волны;

$\varkappa_\zeta$ — редукционный коэффициент, учитывающий влияние поперечных размеров корабля.

Для приближенных расчетов может быть применено выражение

$$\varkappa_\zeta = \varkappa_{\zeta T} \cdot \varkappa_{\zeta B}, \tag{98}$$

где редукционный коэффициент $\varkappa_{\zeta T}$ учитывает влияние осадки корабля, или, точнее, влияние уменьшения радиуса орбит частиц волны с по-

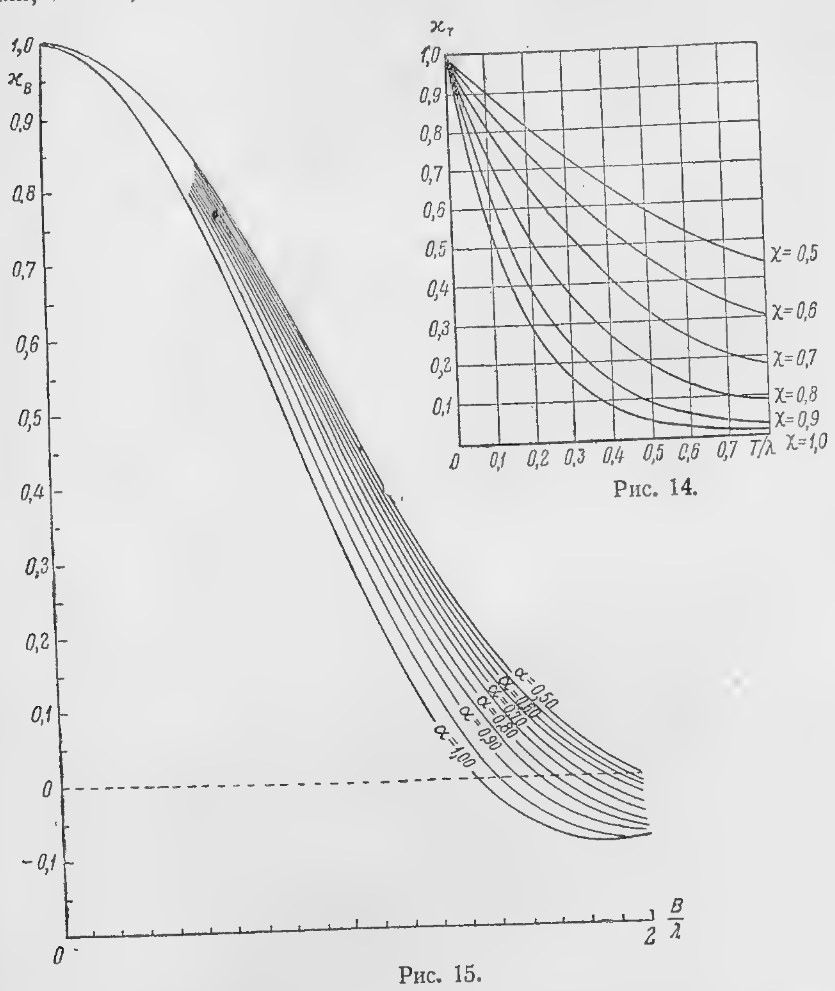


Рис. 14.

Рис. 15.

гружением их под поверхность воды, и определяется по кривым рис. 12 в зависимости от отношения $\frac{T}{\lambda}$ и коэффициента вертикальной полноты χ.

Коэффициент $\varkappa_{\zeta B}$ учитывает влияние кривизны волны на протяжении ширины корабля и определяется по кривым рис. 13 в зависимости от отношения $\frac{B}{\lambda}$ и коэффициента полноты ватерлинии α.

Амплитуда возмущающей силы при боковой качке корабля, расположенного лагом к волне, определяется величиной эффективного угла склона волны:

$$\alpha_m = \varkappa_\theta \alpha_0, \tag{99}$$

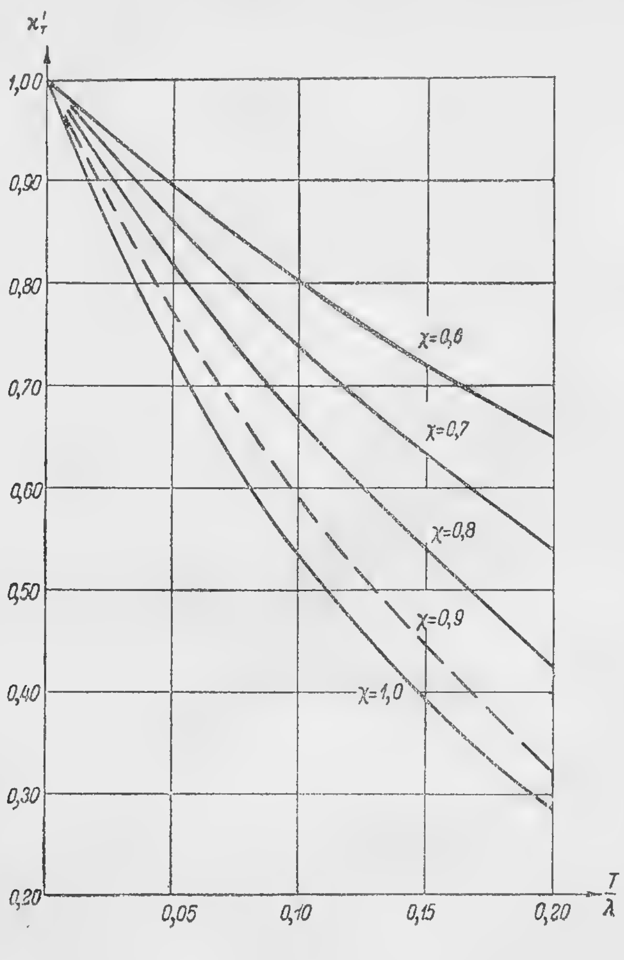


Рис. 16.

где α_0 — наибольший угол склона волновой поверхности, определяемый по формуле (55);

$\varkappa_\theta$ — редукционный коэффициент, учитывающий влияние поперечных размеров корабля.

Для весьма приближенных расчетов может быть применено выражение

$$\varkappa_\theta = \varkappa_T \varkappa_B, \tag{100}$$

где $\varkappa_T$ — коэффициент, учитывающий влияние осадки корабля, проявляющееся благодаря уменьшению радиусов орбитального движения частиц волны с погружением их под поверхность воды и определяемый по кривым рис. 14 в функции от отношения T/λ и коэффициента вертикальной полноты χ.

$\varkappa_B$ — коэффициент, учитывающий влияние ширины корабля; определяется по кривым рис. 15 в зависимости от отношения B/λ и коэффициента полноты ватерлинии α.

Коэффициенты $\varkappa_T$ и $\varkappa_B$ предложены проф. Г. Е. Павленко.

При малых отношениях B/λ величины $\varkappa_{\zeta B}$ и $\varkappa_B$ могут быть также определены по приближенной формуле, предложенной А. Н. Крыловым:

$$\varkappa_{\zeta B} \cong \varkappa_B \cong \frac{\lambda}{\pi B} \sin \frac{\pi B}{\lambda}. \tag{101}$$

Точнее, нежели по кривым рис. 14, величина коэффициента $\varkappa_T$ при боковой качке может быть определена по формуле:

$$\varkappa_T = \varkappa'_T - \varkappa''_T \frac{T}{(r-a)} - \varkappa'''_T \frac{z_p}{(r-a)}, \tag{102}$$

где T — осадка; $(r-a)$ — метацентрическая высота;

z_p — возвышение центра тяжести судна над плоскостью действующей ватерлинии на спокойной воде:

$$z_p = z_g - T. \tag{103}$$

Коэффициенты $\varkappa'_T$, $\varkappa''_T$ и $\varkappa'''_T$ определяются по графикам рис. 16—18 в функции от отношения $\frac{T}{\lambda}$ и коэффициента вертикальной полноты χ судна.

Для более точных расчетов рекомендуется вычислять редукционные коэффициенты $\varkappa_\zeta$ и $\varkappa_\theta$ по способу, разработанному А. В. Герасимовым на основании зависимостей общей теории качки корабля акад. А. Н. Крылова.

Редукционный коэффициент к полувысоте волны r_0 при расчете вертикальной качки:

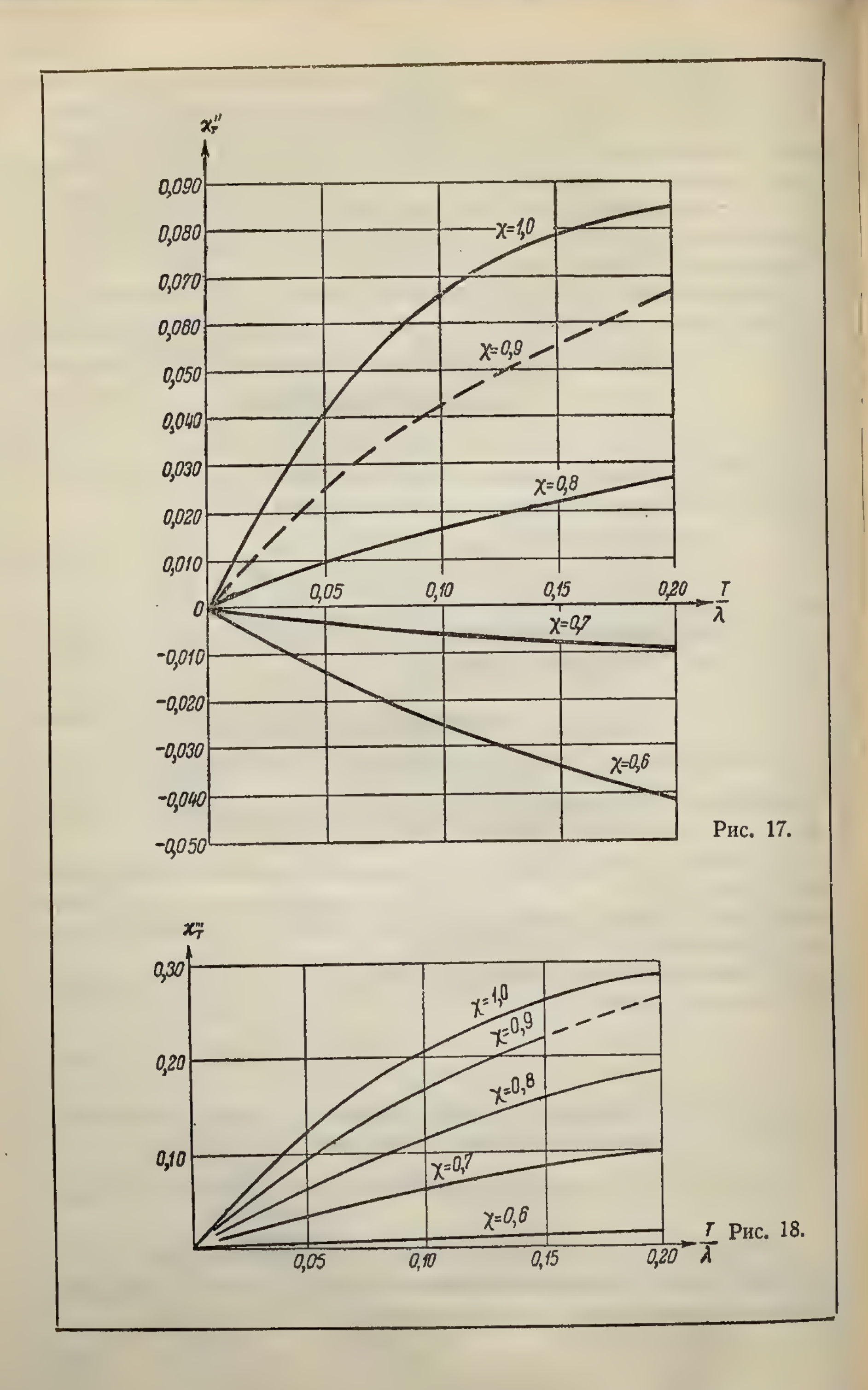
$$\varkappa_\zeta = \frac{\delta}{\alpha} \theta_1\left(b, \frac{B}{T}\right) + \frac{1}{\alpha} \theta_2\left(b, \frac{B}{T}\right) + \theta_3\left(b, \frac{B}{T}\right), \tag{104}$$

где δ и α — коэффициенты общей полноты и площади ватерлинии;

b — относительная ширина корабля;

$$b = \frac{\pi B}{\lambda}. \tag{105}$$

Значения функций $\theta_i\left(b, \frac{B}{T}\right)$ снимаются с графиков рис. 19—21 при B/T, соответствующем заданному кораблю для ряда постоянных значений относительной ширины корабля b.



ϰ''_T
0,090
0,080
0,070
0,080
0,050
0,040
0,030
0,020
0,010
0
−0,010
−0,020
−0,030
−0,040
−0,050
0,05
0,10
0,15
0,20
T/λ
χ=1,0
χ=0,9
χ=0,8
χ=0,7
χ=0,6
ϰ'''_T
0,30
0,20
0,10
0,05
0,10
0,15
0,20
T/λ
χ=1,0
χ=0,9
χ=0,8
χ=0,7
χ=0,6

Рис. 17.

Рис. 18.

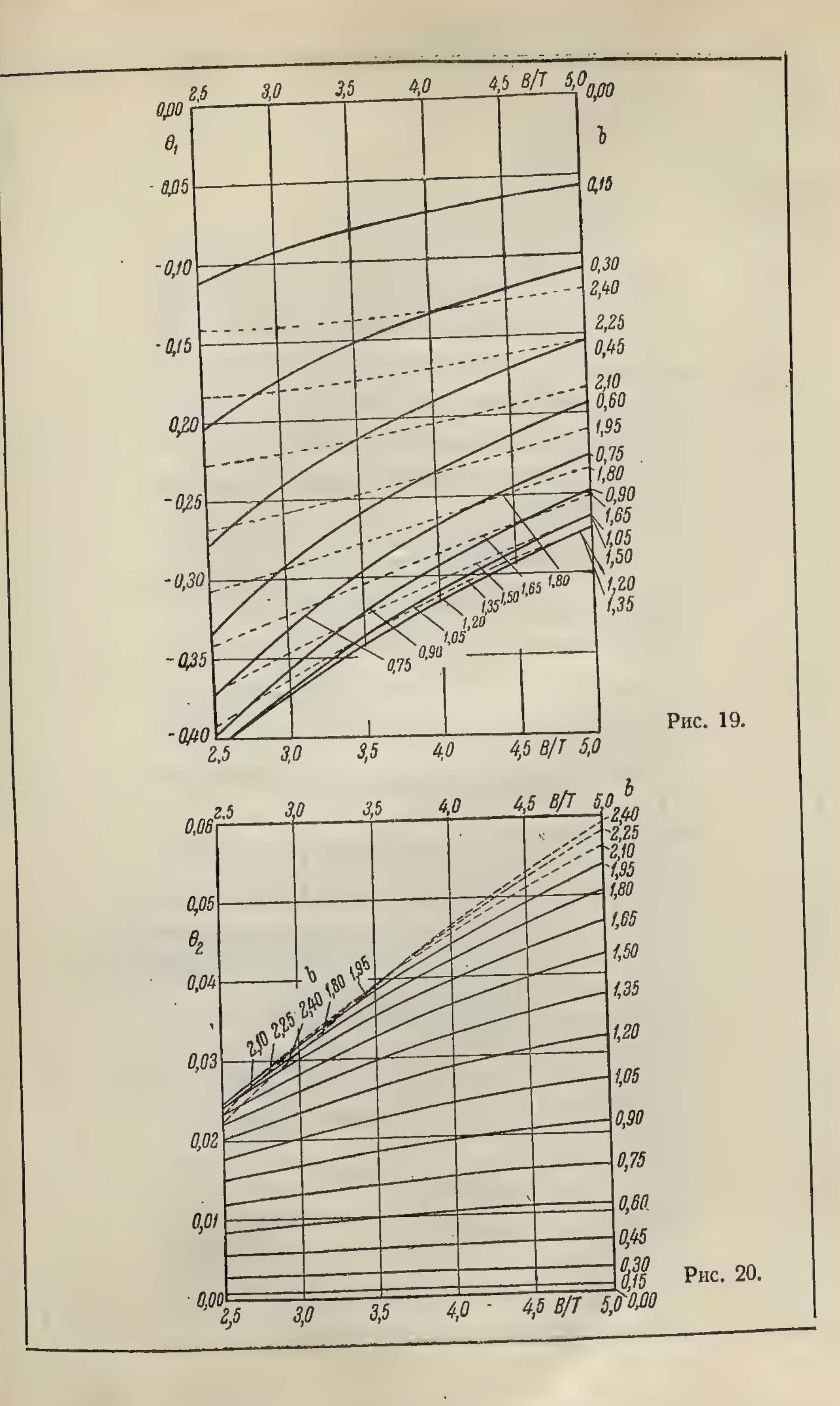
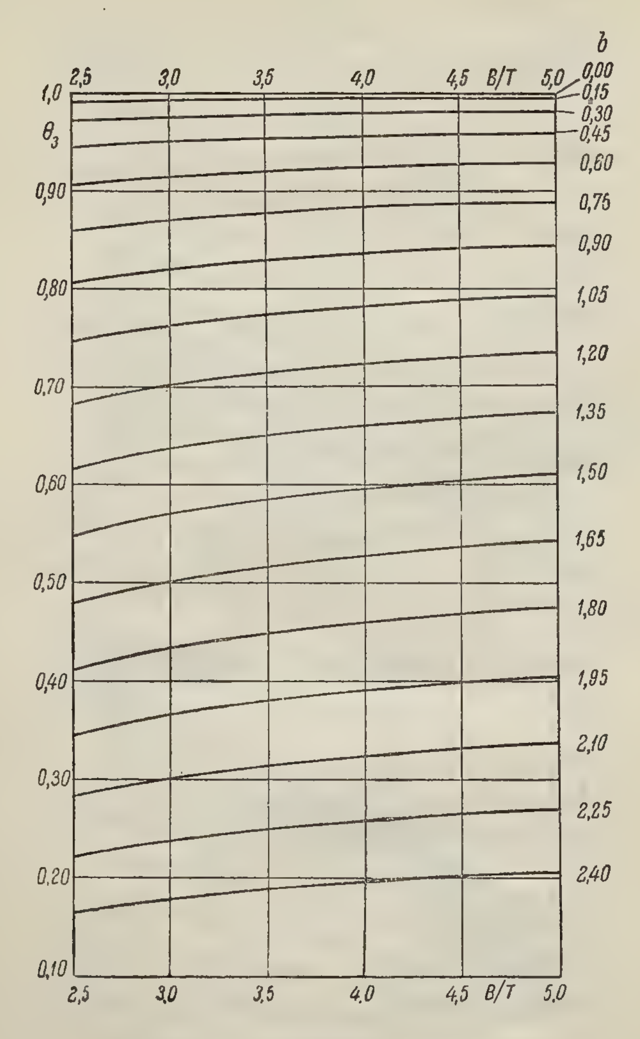

2,5
3,0
3,5
4,0
4,5
B/T
5,0
0,00
θ1
b
0,15
0,30
2,40
2,25
0,45
2,10
0,60
1,95
0,75
1,80
0,90
1,65
1,05
1,50
1,20
1,35
-0,05
-0,10
-0,15
0,20
-0,25
-0,30
-0,35
-0,40
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
θ2
1,50
1,35
1,20
1,05
0,90
0,75
0,60
0,45
0,30
0,15

Рис. 19.

Рис. 20.



b
2,5
3,0
3,5
4,0
4,5
B/T
5,0
0,00
0,15
0,30
0,45
0,60
0,75
0,90
1,05
1,20
1,35
1,50
1,65
1,80
1,95
2,10
2,25
2,40
1,0
θ_3
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10

Рис. 21.

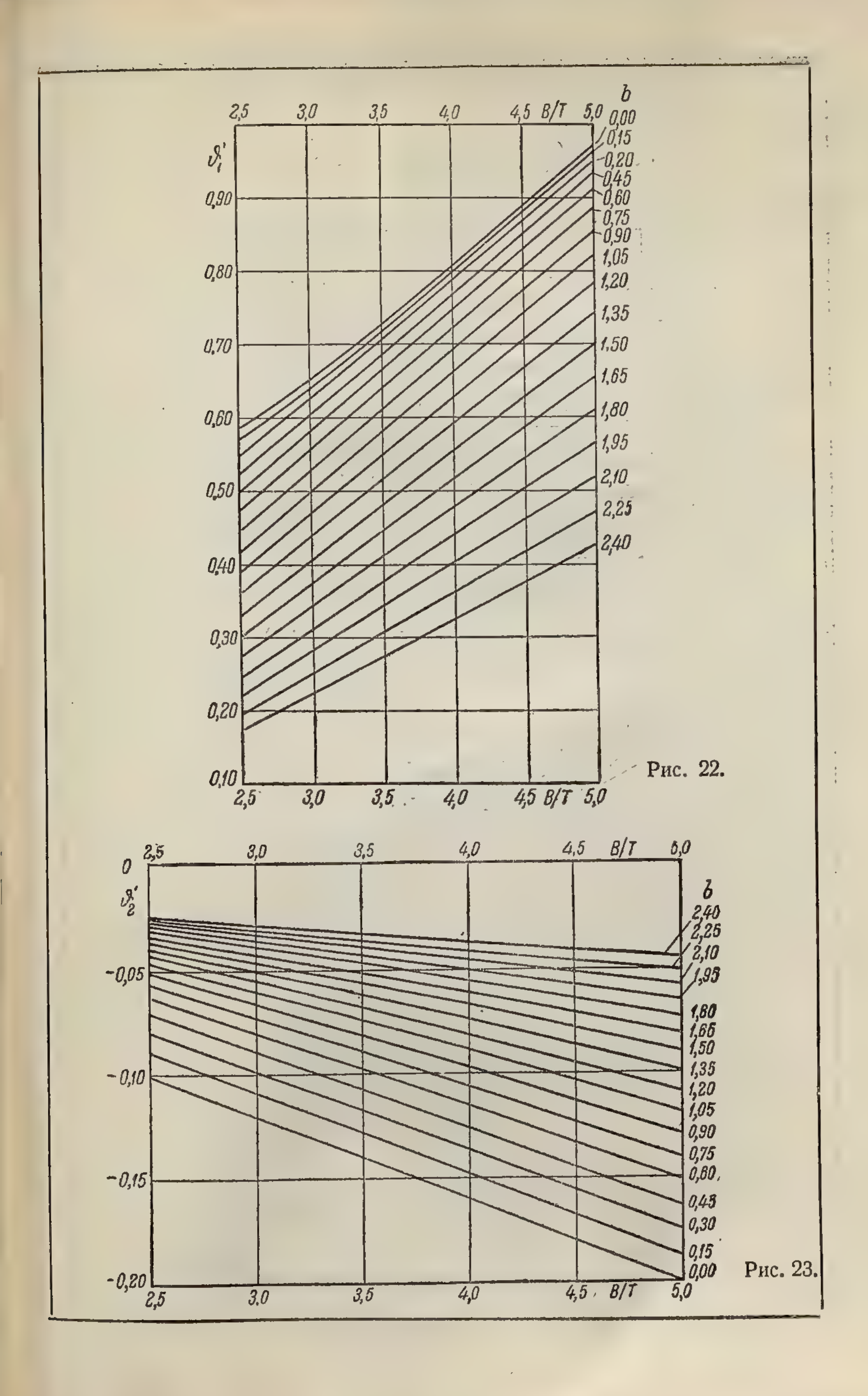
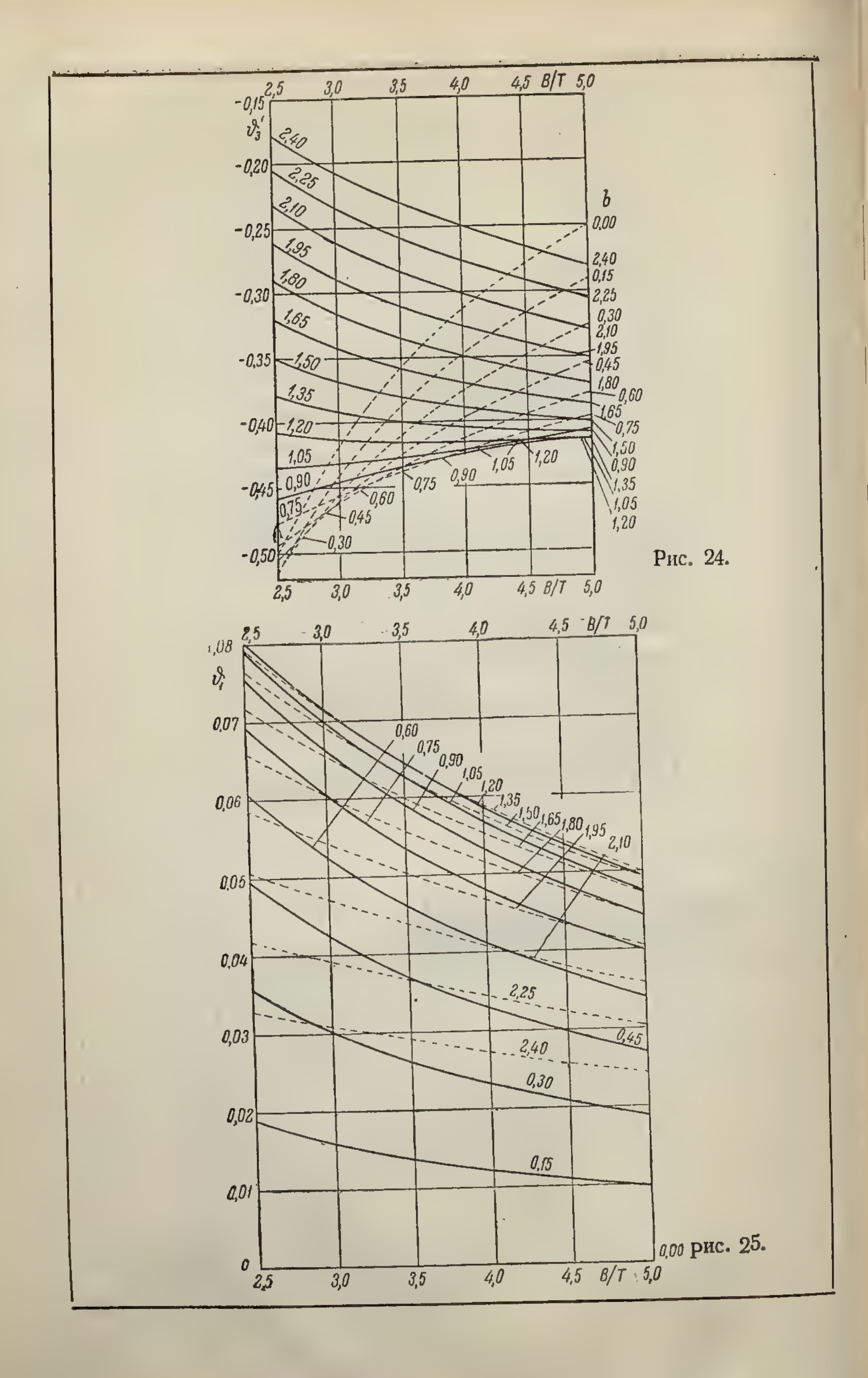

b
2,5
3,0
3,5
4,0
4,5
B/T
5,0
0,00
0,15
0,20
0,45
0,60
0,75
0,90
1,05
1,20
1,35
1,50
1,65
1,80
1,95
2,10
2,25
2,40
ϑ_1'
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10

Рис. 22.

2,5
3,0
3,5
4,0
4,5
B/T
5,0
0
ϑ_2'
-0,05
-0,10
-0,15
-0,20
b
2,40
2,25
2,10
1,95
1,80
1,65
1,50
1,35
1,20
1,05
0,90
0,75
0,60
0,45
0,30
0,15
0,00

Рис. 23.



2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 B/T 5,0
ϑ_3'
b
-0,15
-0,20
-0,25
-0,30
-0,35
-0,40
-0,45
-0,50

Рис. 24.

2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 B/T 5,0
ϑ_1
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
0,00

Рис. 25.

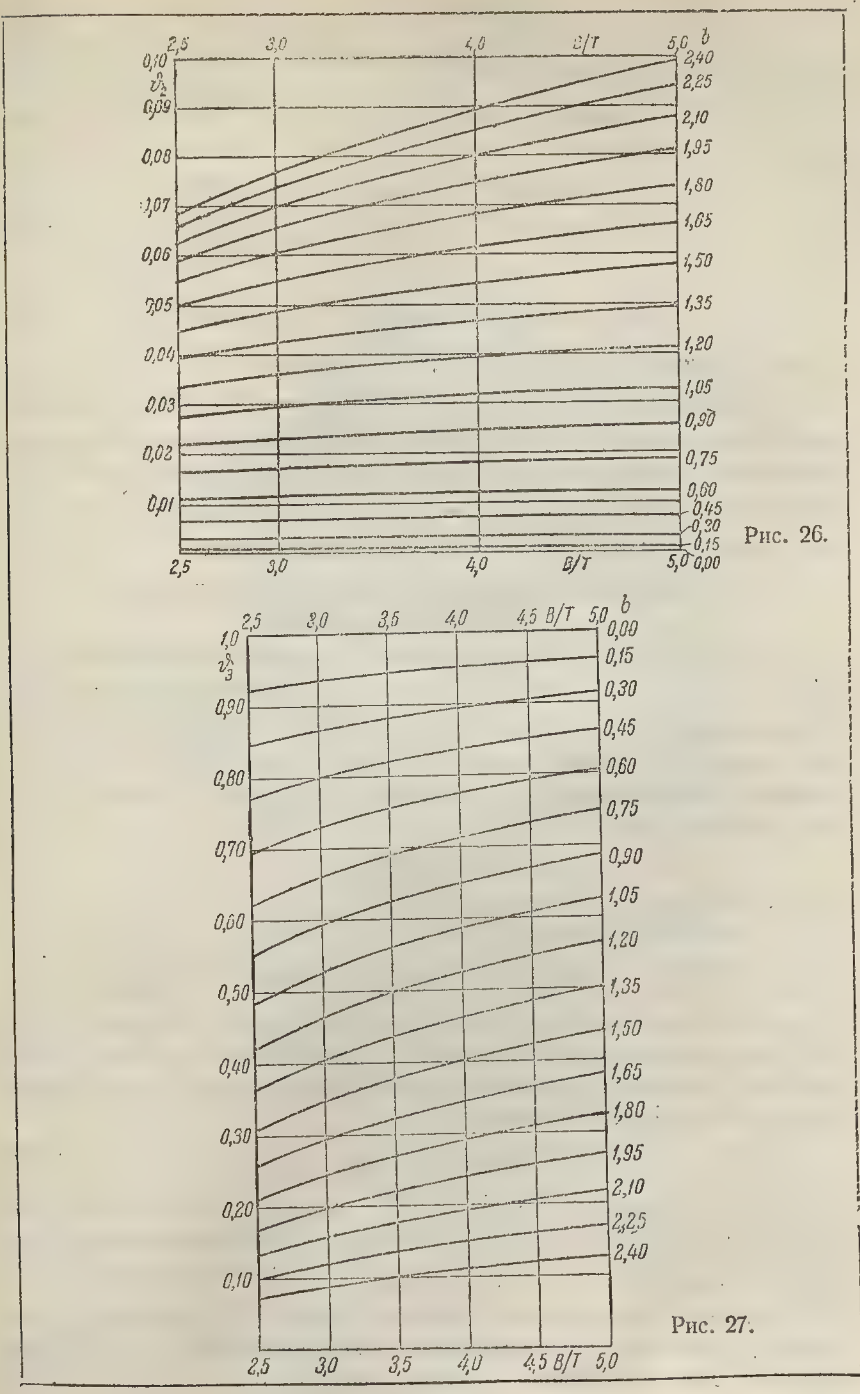

2,5
3,0
4,0
B/T
5,0
b
ϑ₂
0,10
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
2,40
2,25
2,10
1,95
1,80
1,65
1,50
1,35
1,20
1,05
0,90
0,75
0,60
0,45
0,30
0,15
0,00
3,5
4,5
ϑ₃
1,0
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10

Рис. 26.

Рис. 27.

Редукционный коэффициент $\varkappa_\theta$ к наибольшему углу волнового склона α_0 при расчете боковой качки:

$$\varkappa_\theta = \varkappa_\theta'\left(1 + \frac{T - z_g}{r - a}\right) - \varkappa_\theta'' \frac{T - z_g}{r - a}, \tag{106}$$

где

$$\varkappa_\theta' = \frac{\frac{\alpha}{\delta}\vartheta_1'\left(b, \frac{B}{T}\right) + \frac{1}{\delta}\vartheta_2'\left(b, \frac{B}{T}\right) + \vartheta_3'\left(b, \frac{B}{T}\right)}{\frac{\alpha}{\delta}\vartheta_1'\left(0, \frac{B}{T}\right) + \frac{1}{\delta}\vartheta_2'\left(0, \frac{B}{T}\right) + \vartheta_3'\left(0, \frac{B}{T}\right)}, \tag{107}$$

$$\varkappa_\theta'' = \frac{\alpha}{\delta}\vartheta_1\left(b, \frac{B}{T}\right) + \frac{1}{\delta}\vartheta_2\left(b, \frac{B}{T}\right) + \vartheta_3\left(b, \frac{B}{T}\right), \tag{108}$$

где z_g — возвышение ЦТ над основной плоскостью.

Значения функций $\vartheta_i\left(b, \frac{B}{T}\right)$ и $\vartheta_i'\left(b, \frac{B}{T}\right)$ снимаются с графиков рис. 22—27 при B/T, соответствующем заданному кораблю для ряда постоянных значений относительной ширины b. В знаменателе формулы (107) обозначения $\vartheta_i'\left(0, \frac{B}{T}\right)$ указывают на значения соответствующих функций при $b = 0$, т. е. на тихой воде.

§ 7. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ХОДА И КУРСА КОРАБЛЯ НА БОКОВУЮ КАЧКУ

Скорость хода корабля влияет на величину сопротивления его бортовой качке. Соответствующие данные приведены в § 3. Кроме того, если направление скорости хода корабля составляет угол φ с направлением скорости бега волн, промежуток времени между встречами корабля с двумя последовательными волнами будет равен не истинному периоду волн, а некоторому кажущемуся периоду, величина которого равна

$$\tau_к = \frac{\lambda}{c - v\cos\varphi}, \tag{109}$$

где $\tau_к$ — кажущийся период волн, сек.;

λ — истинная длина волн, *м*;

$c = 1{,}25\sqrt{\lambda}$ — скорость бега волн, *м* · сек.$^{-1}$;

v — скорость хода корабля, *м* · сек.$^{-1}$.

Изменяя скорость хода или курс корабля, можно изменить величину кажущегося периода и тем избежать условий резонанса, либо наоборот, приблизиться к ним. Решая уравнение (109) относительно $v\cos\varphi$, можно получить зависимость:

$$v\cos\varphi = c - \frac{\lambda}{\tau_к}. \tag{110}$$

Задаваясь значением $\tau_к = T$, где T — период боковой качки судна на тихой воде, можно получить то наименее благоприятное значение $v\cos\varphi$ при данных λ, при котором возникает резонанс с боковой качкой, и амплитуды качки будут наибольшими.

С помощью диаграмм, предложенных проф. В. Г. Власовым, можно удобно установить те неблагоприятные значения $v\cos\varphi$, при которых возможна усиленная качка. Одна из диаграмм приведена на рис. 28.

На диаграммах направление гребней — вертикальное, направление бега волн — справа налево, исходящие из центра лучи — направления скорости хода корабля, радиусы концентрических окружностей —

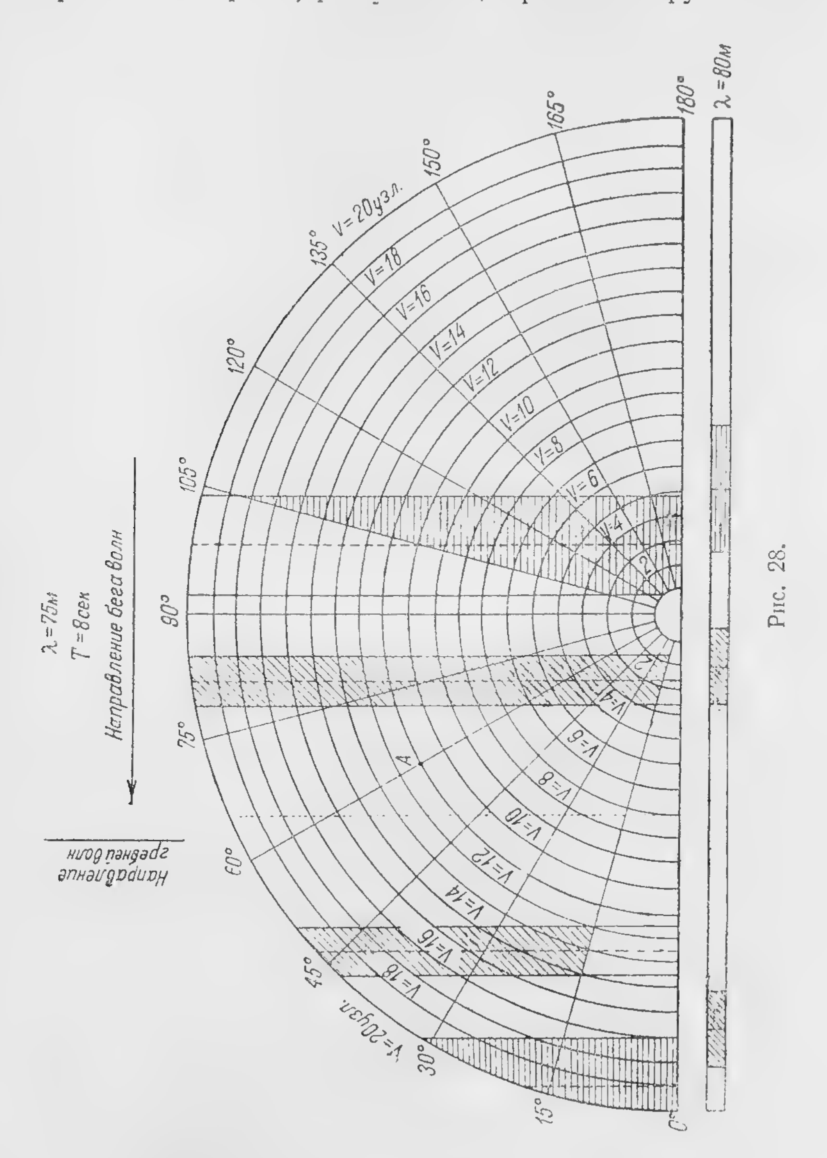


Рис. 28.

величины скорости корабля в узлах. Курсовые углы показаны через 15°. Вычерчены половины диаграмм, так как они симметричны относительно прямой 0—180°. Каждая диаграмма строится для определенной длины волны λ и определенного периода T боковой качки корабля.

Скорости хода корабля v и курсовому углу φ на диаграммах соответствует определенная точка, и наоборот. Например, скорости $v = 24$ узла и углу $\varphi = 60°$ отвечает точка A (рис. 28). При постоянной скорости и меняющемся курсовом угле отвечающая кораблю точка перемещается по окружности; при неизменном угле и меняющейся скорости та же точка перемещается вдоль луча. При одновременном изменении скорости и курса так, чтобы произведение $v \cos\varphi$ оставалось постоянным, та же точка перемещается по вертикали.

Заштрихованными косой штриховкой полосами показаны зоны усиленной боковой качки. Пограничные вертикали полос соответствуют значениям $v \cos\varphi$, вычисленным по формуле (110) при значениях $\tau_к = 0,7\ T$ и $\tau_к = 1,3\ T$. Жирные вертикальные линии, разделяющие полосы пополам, соответствуют максимальной бортовой качке при $\tau_к = T$.

Полосами, заштрихованными горизонтальной штриховкой, показаны зоны усиленной килевой качки, соответствующие значениям $0,7\ T_1 < \tau_к < 1,3\ T_1$, где T_1 — период килевой качки на тихой воде.

Диаграммы вычерчиваются для ряда значений длин волн и периодов боковой качки, возможных в эксплоатации данного корабля. Период килевой качки в условиях службы корабля меняется очень мало, и потому для всех диаграмм может быть принята его средняя величина.

Диаграммы строятся в предположении, что волнение правильное, т. е. гребни волн — равноотстоящие параллельные прямые. Чем неправильнее волнение, тем менее надежны результаты, даваемые диаграммами.

При рассмотрении мореходных качеств судна представляет также интерес выяснить, при каких значениях длин волн λ и курсовых углов φ судно, имеющее заданные период боковой качки и скорость хода, попадает в область резонанса с боковой качкой. При этом можно положить, что область резонанса ограничивается пределами отношения $\frac{T}{\tau}$:

$$0,7 < \frac{T}{\tau} < 1,3.$$

Для исследования этого вопроса следует решить уравнение (109) относительно λ:

$$\lambda = \frac{\tau}{2}\left(1,56\tau - 2v\cos\varphi \mp \sqrt{2,44\tau^2 - 6,24v\tau\cos\varphi}\right). \qquad (111)$$

Выражение (111) дает действительные значения λ, если

$$\cos\varphi \leq 0,39\frac{\tau}{v}; \qquad (112)$$

здесь v — заданная скорость хода, *м*/сек. и τ — период волн, сек., принимаемый 0,7 T, либо T, либо 1,3 T. Выражение (111) дает искомую функциональную зависимость.

Результаты вычислений по формуле (111) могут быть представлены графически для различных $x = \frac{T}{\tau}$ в виде предложенной С. Н. Бла-

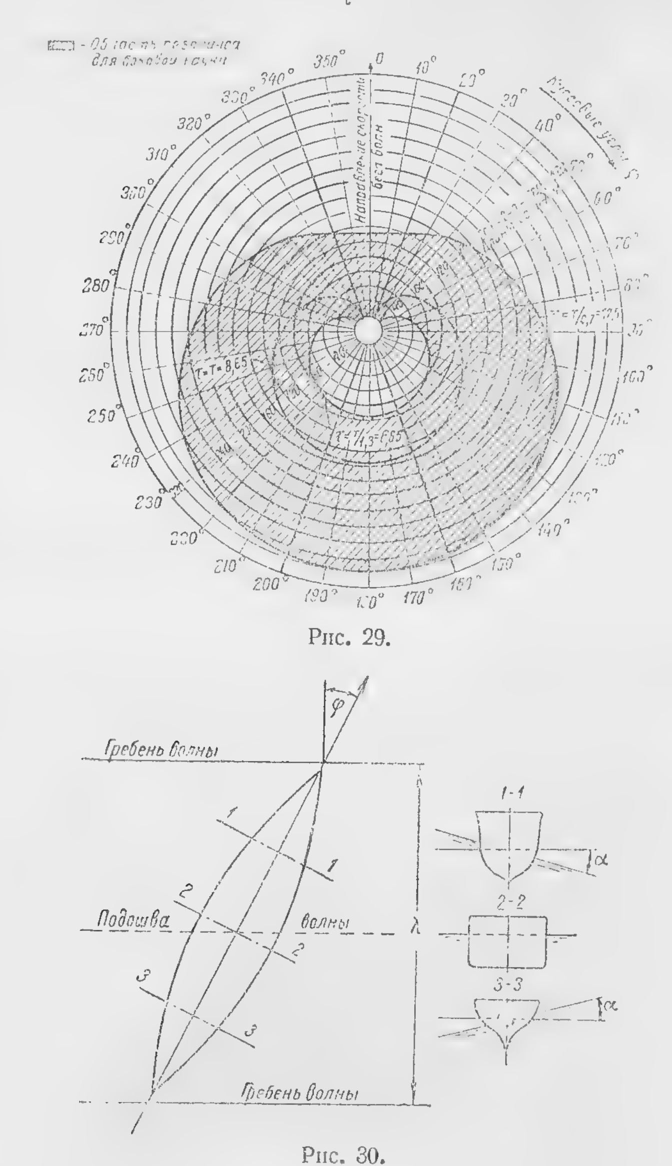


Рис. 29.

Рис. 30.

говещенским полярной диаграммы, дающей представление о вероятности попадания судна в условия, близкие к резонансу. Общий вид диаграммы показан на рис. 29.

Выбрав по диаграмме интересующие значения λ и φ, можно провести расчет качки для данных конкретных условий.

Курсовой угол корабля влияет также на амплитуду возмущающей силы при бортовой качке, так как значения действующего угла волнового склона при косом курсе изменяются для различных поперечных сечений корабля не только по величине, но и по знаку (рис. 30).

В случае, если направление скорости хода корабля составляет угол φ с направлением бега волн, действующий угол волнового склона для всего корабля может быть определен по приближенной формуле:

$$\alpha_{m\varphi} = \varkappa_{\varphi}\alpha_m \sin\varphi. \tag{113}$$

где $\alpha_{m\varphi}$ — действующий угол волнового склона при курсовом угле φ;
α_m — действующий угол волнового склона при положении судна лагом к волне, т. е. при $\varphi = 90°$;
$\varkappa_{\varphi}$ — редукционный коэффициент, величина которого может быть рассчитана по предложенной С. Н. Благовещенским приближенной формуле

$$\varkappa_{\varphi} = \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y^3 \cos\frac{2\pi x\cos\varphi}{\lambda}\,dx}{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y^3 dx}, \tag{114}$$

где y — ординаты грузовой ватерлинии.

§ 8. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА БОКОВОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ СУДНА НА ВОЛНЕНИИ

Элементы судна (рыболовного траулера)

Длина по грузовой	$L = 49{,}1$ *м*
Ширина по грузовой	$B = 9{,}00$ „
Осадка	$T = 3{,}68$ „
Водоизмещение	$D = 936$ *т*
Возвышение ЦВ над килем	$Z_c = 2{,}20$ *м*
Возвышение ЦТ над килем	$Z_g = 3{,}69$ „
Метацентрическая высота	$r - a = 0{,}73$ „
Площадь ватерлинии	$S = 348$ *м*^{2}
Скорость хода	$v = 7$ узлов
Объемный вес воды	$\gamma = 1{,}025$ *т/м*^{3}

Чебышевские шпангоуты судна изображены на рис. 31.

Момент инерции массы относительно центральной продольной оси определяется по приближенной формуле (32):

$$A = \frac{D}{12g}(B^2 + 4Z_g^2) = \frac{936}{12\cdot 9{,}81}(9^2 + 4\cdot 3{,}69^2) = 1072\ т\cdot м\cdot сек^2.$$

Величина добавочного момента инерции присоединенной массы воды принята, по данным модельных испытаний, равной 20% от вычисленного значения. Отсюда

$$A_1 = A + \Delta A = 1{,}20\cdot 1072 = 1290\ т\cdot м\cdot сек^2.$$

Коэффициент присоединенной массы:

$$q = \frac{\Delta A}{A + \Delta A} = \frac{0,20}{1,20} = 0,167.$$

Период боковой качки судна на тихой воде (15):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A + \Delta A}{D\,(r - a)}} = 2\pi \sqrt{\frac{1290}{936 \cdot 0,73}} = 8,63 \text{ сек.}$$

Для суждения о вероятности попадания судна в условия резонанса вычисляются значения длин волн $\lambda = f(\varphi)$, отвечающие условиям резонанса $\frac{T}{\tau} = x = 1$, а также значениям $x = 0,7$ и $x = 1,3$.

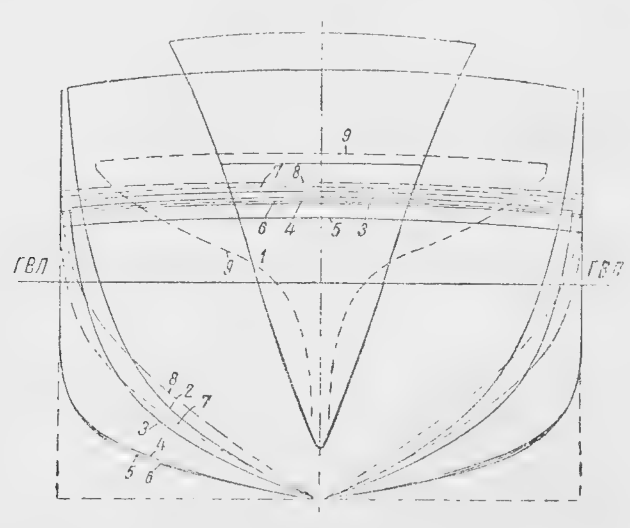


Рис. 31.

Скорость хода судна равна:

$$v = 0,514 \cdot 7 = 3,60 \ \text{м/сек.}$$

Для вычисления λ при $x = 1,0$ в выражение (111) подставляются численные значения $\tau = 8,63$ сек. и $v = 3,60$:

$$\lambda = \frac{8,63}{2}(1,56 \cdot 8,63 - 2 \cdot 3,6 \cdot \cos\varphi \mp$$

$$\mp \sqrt{2,44 \cdot 8,63^2 - 6,24 \cdot 3,6 \cdot 8,63 \cos\varphi}) =$$

$$= 4,31\,(13,5 - 7,20 \cos\varphi \mp \sqrt{182 - 194 \cos\varphi}).$$

Дальнейшие вычисления выполнены в табл. 6.

Совершенно аналогично произведены расчеты длин λ для значений $x = \frac{T}{\tau} = 0,7$ и $x = \frac{T}{\tau} = 1,3$. На основании результатов вычислений, на рис. 29 построена полярная диаграмма длин синхронных волн

$\lambda = f(\varphi)$. Заштрихованный участок заключает в себе область, близкую к условиям резонанса, когда можно ожидать появления значительной боковой качки. При рассмотрении диаграммы следует иметь в виду, что величины амплитуд качки по сделанным предположениям должны быть пропорциональны значениям $\varkappa_\varphi \sin\varphi$. Поэтому при курсовых углах, близких к 0 или 180° качка не будет значительной даже при наличии полной синхронности.

Таблица 6

Вычисление длин синхронных волн

φ	$\cos\varphi$	$7{,}2 \cdot \cos\varphi$	$13{,}5 - \text{III}$	$194 \cos\varphi$	$182 - \text{V}$	$\sqrt{\text{VI}}$	$\text{IV} + \text{VII}$	$\text{IV} - \text{VII}$	$\lambda_1 = 4{,}31 \times \times \text{VIII}$	$\lambda_2 = 4{,}31 \cdot \text{IX}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0	1,000	7,20	6,30	194	—	—	—	—	—	—
10	0,985	7,09	6,41	191	—	—	—	—	—	—
20	0,940	6,76	6,74	183	—	—	—	—	—	—
30	0,866	6,23	7,27	168	14	3,74	11,01	3,53	47	15,2
40	0,766	5,52	7,98	149	33	5,75	13,73	2,23	59	9,6
50	0,643	4,63	8,87	125	57	7,56	16,43	1,31	71	5,7
60	0,500	3,60	9,90	97	85	9,22	19,12	0,68	82	2,9
70	0,342	2,46	11,01	66	116	10,78	21,82	0,26	94	1,1
80	0,174	1,25	12,25	34	148	12,18	24,43	~0	105	—
90	0	0	13,50	0	182	13,50	27,00	~0	116	—
100	—0,174	—1,25	14,75	—34	216	14,72	29,47	~0	127	—
110	—0,342	—2,46	15,96	—66	248	15,76	31,72	~0	137	—
120	—0,500	—3,60	17,10	—97	279	16,80	33,90	~0	146	—
130	—0,643	—4,63	18,13	—125	307	17,52	35,65	~0	154	—
140	—0,766	—5,52	19,02	—149	331	18,20	37,22	0,82	160	3,5
150	—0,866	—6,23	19,73	—168	350	18,72	38,45	1,01	166	4,3
160	—0,940	—6,76	20,26	—183	365	19,10	39,36	1,16	169	5,0
170	—0,985	—7,09	20,59	—191	373	19,32	39,91	1,27	172	5,5
180	—1,000	—7,20	20,70	—194	376	19,40	40,30	1,30	174	5,6

Пусть требуется произвести расчет амплитуд качки при $\lambda = 116$ *м*, когда согласно полярной диаграмме

$$[illegible] = \frac{T}{\tau} = 1{,}0.$$

Высота волны по формуле (56)

$$2r_0 = 0{,}17\lambda^{3/4} = 0{,}17 \cdot 116^{3/4} = 6{,}0 \ \text{м}.$$

Наибольший угол склона волновой поверхности

$$\alpha_0 = \frac{2\pi r_0}{\lambda} = 3{,}14\,\frac{6{,}0}{116} = 0{,}162 \cong 9{,}3^\circ.$$

Редукционные коэффициенты, учитывающие влияние поперечных размеров, определяются по графикам Павленко. Предварительно определяются коэффициенты полноты судна.

Коэффициент полноты площади ватерлинии

$$\alpha = \frac{S}{LB} = \frac{348}{49{,}1 \cdot 9{,}0} = 0{,}788.$$

Коэффициент вертикальной полноты:

$$\chi = \frac{V}{ST} = \frac{936}{1{,}025 \cdot 348 \cdot 3{,}68} = 0{,}715.$$

Отношение осадки к длине волны:

$$\frac{T}{\lambda} = \frac{3{,}68}{116} = 0{,}0317.$$

Отношение ширины судна к длине волны:

$$\frac{B}{\lambda} = \frac{9{,}00}{116} = 0{,}0775.$$

Редукционный коэффициент, учитывающий влияние осадки судна на амплитуду вертикальной качки, определяется по графику рис. 12:

$$\varkappa_{\zeta T} = 0{,}89.$$

Редукционный коэффициент, учитывающий влияние ширины судна на вертикальную качку, определяется по графику рис. 13:

$$\varkappa_{\zeta B} \cong 0{,}99.$$

Приведенная полувысота волны:

$$r_m = 0{,}89 \cdot 0{,}99 \cdot \frac{6{,}00}{2} = 2{,}64.$$

Редукционный коэффициент, учитывающий влияние осадки судна на бортовую качку, определяется по графику рис. 14:

$$\varkappa_T = 0{,}90.$$

Редукционный коэффициент, учитывающий влияние ширины судна на боковую качку, определяется по графику рис. 15:

$$\varkappa_B = 0{,}99.$$

Эффективный угол волнового склона:

$$\alpha_m = 0{,}90 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}162 = 0{,}144.$$

Присоединенная масса воды при вертикальной качке определяется по формуле (171) Павленко (§ 12):

$$\Delta M = 0{,}85 \frac{\pi}{4} \frac{\gamma}{g} LB^2 \frac{\alpha^2}{1+\alpha} = 0{,}85 \frac{3{,}14}{4} \cdot \frac{1{,}025}{9{,}81} \cdot 49{,}1 \cdot 9{,}0^2 \cdot \frac{0{,}788^2}{1{,}79} =$$

$$= 87{,}3 = 0{,}915 \frac{D}{g}.$$

Коэффициент присоединенной массы:

$$q_1 = \frac{\Delta M}{\frac{D}{g} + \Delta M} = \frac{0{,}915}{1{,}915} = 0{,}478.$$

Период вертикальной качки судна на тихой воде:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{D}{g} + \Delta M}{\gamma S}} = 2\pi \sqrt{\frac{1{,}915\,\frac{936}{9{,}81}}{1{,}025 \cdot 348}} = 4{,}50 \text{ сек.}$$

Частота вертикальной качки:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4{,}50} = 1{,}4 \text{ сек.}^{-1}.$$

Момент сил сопротивления боковой качке принимается действующим по квадратичному закону и определяется по приближенной формуле (38):

$$M = KA_1\dot{\theta}^2,$$

где

$$K = \frac{kLB^4}{A_1}.$$

Коэффициент k принимается равным $k = 0{,}0015$ $m \cdot м^{-4}$ сек.^{2}.

$$A_1 = A + \Delta A = 1290 \; m \cdot м \cdot \text{сек.}^2.$$

$$K = 0{,}0015\,\frac{49{,}1 \cdot 9^4}{1290} = 0{,}374.$$

Сила сопротивления вертикальной качке принимается действующей по линейному закону при величине коэффициента сопротивления согласно формуле (178) и рекомендации И. Г. Бубнова (§ 13):

$$2N_1 = 0{,}18S = 0{,}18 \cdot 348 = 62{,}6 \; m \cdot \text{сек} \cdot м^{-1}.$$

Относительный коэффициент сопротивления вертикальной качке (81)

$$\mu_1 = \frac{N_1}{\left(\frac{D}{g} + \Delta M\right)\omega} = \frac{62{,}6}{2 \cdot 1{,}915\,\frac{936}{9{,}81}\,1{,}4} = 0{,}122.$$

Ввиду того, что бортовая качка происходит в условиях резонанса, расчет амплитуд ее может быть произведен по формулам (95) без пересчета на линейный закон сопротивления

$$\varphi_m = 1{,}085 \sqrt{\frac{\alpha_m}{K}\,\frac{A}{A + \Delta A}} = 1{,}085 \sqrt{\frac{0{,}144}{0{,}374} \cdot \frac{1072}{1290}} = 0{,}614.$$

Амплитуда бортовой качки в абсолютных координатах:

$$\theta_m = \sqrt{\varphi_m^2 + \alpha_m^2} = \sqrt{0{,}614^2 + 0{,}144^2} = 0{,}630$$

или в градусах

$$\theta^{\circ}_m = 57{,}3 \cdot 0{,}63 = 36^{\circ}.$$

Отношение периода возмущающей силы к периоду вертикальной качки корабля на тихой воде:

$$x_1 = \frac{T_1}{\tau} = \frac{4{,}50}{8{,}63} = 0{,}521.$$

Амплитуда относительной вертикальной качки (83):

$$Z_m = \frac{\varkappa_\zeta r_0 (1 - q_1)\, x_1^2}{\sqrt{(1 - x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}} = \frac{2{,}64\,(1 - 0{,}478)\, 0{,}521^2}{\sqrt{(1 - 0{,}521^2)^2 + 4 \cdot 0{,}122^2 \cdot 0{,}521^2}} = 0{,}69 \text{ м}.$$

Амплитуда абсолютной вертикальной качки (86):

$$\zeta_m = \varkappa_\zeta r_0 \sqrt{\frac{(1 - q_1 x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}{(1 - x_1^2)^2 + 4\mu_1^2 x_1^2}} =$$

$$= 2{,}64 \sqrt{\frac{(1 - 0{,}478 \cdot 0{,}521^2)^2 + 4 \cdot 0{,}122^2 \cdot 0{,}521^2}{(1 - 0{,}521^2)^2 + 4 \cdot 0{,}122^2 \cdot 0{,}521^2}} = 3{,}14 \text{ м}.$$

В качестве второго примера рассматривается случай бортовой качки судна на синхронной волне при положении диаметральной плоскости под углом $\varphi = 60^{\circ}$. Соответствующая длина синхронной волны равна

$$\lambda = 82{,}5 \text{ м}.$$

Высота волны по формуле (56):

$$2r_0 = 0{,}17 \cdot 82{,}5^{3/4} = 4{,}67.$$

Наибольший угол склона волновой поверхности:

$$\alpha_0 = \frac{\pi \cdot 4{,}67}{82{,}5} = 0{,}178 \cong 10{,}2^{\circ}.$$

Отношение осадки и ширины судна к длине волны:

$$\frac{T}{\lambda} = \frac{3{,}68}{82{,}5} = 0{,}045; \qquad \frac{B}{\lambda} \sin\varphi = \frac{9{,}0 \cdot 0{,}866}{82{,}5} = 0{,}095.$$

Редукционные коэффициенты, учитывающие влияние осадки и ширины судна на бортовую качку, определяются по графикам рис. 14 и 15.

$$\varkappa_T = 0{,}86; \quad \varkappa_B = 0{,}99.$$

Редукционный коэффициент, учитывающий влияние курсового угла на бортовую качку, определяется по формуле (114):

$$\varkappa_\varphi = 0{,}93.$$

Эффективный угол волнового склона:

$$\alpha_m = \varkappa_T \varkappa_B \varkappa_\varphi \alpha_0 \sin\varphi = 0,86 \cdot 0,99 \cdot 0,93 \cdot 0,178 \cdot 0,866 = 0,122.$$

Относительная амплитуда качки определяется по формуле (95):

$$\varphi_m = 1,085 \sqrt{\frac{0,122}{0,374} \cdot \frac{1072}{1290}} = 0,565.$$

Амплитуда бортовой качки в абсолютных координатах в радианах (96):

$$\theta_m = \sqrt{0,565^2 + 0,122^2} = 0,578.$$

Амплитуда качки в градусах

$$\theta_m^\circ = 57,3 \cdot 0,578 = 33,1^\circ.$$

В качестве третьего примера рассматривается бортовая качка судна при том же курсовом угле $\varphi = 60^\circ$, но при длине волн $\lambda = 60$ *м*.

Кажущийся период волн по формуле (109):

$$\tau = \frac{\lambda}{1,25\sqrt{\lambda} - v\cos\varphi} = \frac{60}{1,25\sqrt{60} - 3,6 \cdot 0,5} = 7,60.$$

Отношение периодов

$$x = \frac{T}{\tau} = \frac{8,63}{7,60} = 1,134.$$

Высота волны

$$2r_0 = 0,17 \cdot 60^{3/4} = 3,67.$$

Наибольший угол склона волновой поверхности:

$$\alpha_0 = \frac{\pi \cdot 3,67}{60} = 0,192.$$

Величины отношений:

$$\frac{T}{\lambda} = \frac{3,68}{60} = 0,061; \quad \frac{B\sin\varphi}{\lambda} = \frac{9,00 \cdot 0,866}{60} = 0,13;$$

Величины редукционных коэффициентов по графикам Павленко и по формуле (114).

$$\varkappa_T = 0,82; \quad \varkappa_B = 0,99; \quad \varkappa_\varphi = 0,86.$$

Эффективный угол волнового склона:

$$\alpha_m = 0,82 \cdot 0,99 \cdot 0,86 \cdot 0,192 \cdot 0,866 = 0,116.$$

Коэффициент сопротивления качке определен по формуле (43)

$$\mu = 0,125\, Kx\theta_m,$$

где величиной θ_m амплитуды качки следует задаться. Пусть в первом приближении:

$$\theta_m = 23° \cong 0{,}400 \text{ радиана},$$

тогда

$$2\mu = 0{,}85 \cdot 0{,}374 \cdot 1{,}134 \cdot 0{,}40 = 0{,}144.$$

Амплитуда качки

$$\theta_m = 0{,}116 \sqrt{\frac{(1-qx^2)^2 + 4\mu^2 x^2}{(1-x^2)^2 + 4\mu^2 x^2}} =$$

$$= 0{,}116 \sqrt{\frac{(1-0{,}167 \cdot 1{,}134^2)^2 + 0{,}144^2 \cdot 1{,}134^2}{(1-1{,}134^2)^2 + 0{,}144^2 \cdot 1{,}134^2}} = 0{,}280.$$

Ввиду значительной разницы между ожидавшейся (0,40) и вычисленной (0,28) амплитудами качки следует выполнить расчет во втором приближении. Величина ожидаемой амплитуды во втором приближении принимается:

$$\theta_m = 0{,}28.$$

Коэффициент сопротивления

$$2\mu = 0{,}85 \cdot 0{,}374 \cdot 1{,}134 \cdot 0{,}28 = 0{,}101.$$

Амплитуда качки

$$\theta_m = 0{,}116 \sqrt{\frac{(1-0{,}167 \cdot 1{,}134^2)^2 + 0{,}101^2 \cdot 1{,}134^2}{(1-1{,}134^2)^2 + 0{,}101^2 \cdot 1{,}134^2}} = 0{,}300.$$

Ввиду малой разницы между ожидавшейся и полученной величинами амплитуд, в дальнейших приближениях нет необходимости.

Величина амплитуды в градусах:

$$\theta_m^\circ = 57{,}3 \cdot 0{,}300 = 17{,}2°.$$

Вычисленная величина является амплитудой вынужденных колебаний. Амплитуда собственных колебаний определению не поддается.

§ 9. ПЕРИОД КАЧКИ НА БОЛЬШИХ АМПЛИТУДАХ

В случае, если амплитуды качки достигают таких значений, при которых метацентрическая формула перестает быть точной, формула (15) для определения периода качки становится неверной. Общее выражение для определения периода качки судна на тихой воде в этом случае будет:

$$T = 4\sqrt{\frac{A_1}{2D}} \int_0^{\theta_m} \frac{d\theta}{\sqrt{l_d(\theta_m) - l_d(\theta)}}, \tag{115}$$

где θ_m — начальное отклонение судна;

$l_d(\theta_m)$ — ордината диаграммы динамической остойчивости l_d при $\theta = \theta_m$;

l_d — переменная ордината диаграммы динамической остойчивости:

$$l_d(\theta_m) = \int\limits_0^{\theta_m} l\,d\theta; \quad l_d(\theta) = \int\limits_0^{\theta} l\,d\theta. \tag{116}$$

Формула (115) не может быть использована для непосредственных расчетов по правилам приближенных квадратур, так как при $\theta = \theta_m$ знаменатель подинтегрального выражения обращается в нуль. Поэтому для определения периода качки при больших амплитудах разными авторами были предложены различные приемы.

Наиболее простым является способ проф. Г. Е. Павленко, основанный на преобразовании интеграла (115) путем замены переменной θ на ξ согласно выражению:

$$l_d(\theta) = l_d(\theta_m)\sin^2\xi. \tag{117}$$

Общее выражение (115) при этом преобразуется следующим образом:

$$T = 4\sqrt{2\frac{A_1}{D}}\sqrt{l_{d_m}}\int\limits_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\sin\xi\,d\xi}{l}, \tag{118}$$

где плечо статической остойчивости l рассматривается как сложная функция от ξ, определяемая следующей цепью зависимостей:

$$l = l(\theta); \quad \theta = \theta(l_d); \quad l_d = l_{d_m}\sin^2\xi. \tag{119}$$

Плечо l является функцией угла наклонения θ; угол наклонения рассматривается как функция плеча l_d динамической остойчивости, а плечо l_d связано с независимой переменной ξ зависимостью $l_d = l_{d_m}\sin^2\xi$.

При значении $\xi = 0$ подинтегральная функция обращается в неопределенность. Раскрытие ее дает:

$$\left|\frac{\sin\xi}{l}\right|_{\xi=0} = \frac{1}{\sqrt{2(r-a)\,l_{d_m}}}. \tag{120}$$

Схема расчета интеграла в выражении (118) по правилу трапеций приводится в табл. 7.

Таблица 7

Начальная амплитуда $\theta_m =$

Соответствующее плечо динамической остойчивости $l_{d_m} =$

№	ξ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	Σ'	Попр.	Исправл. Σ
I	$\sin\xi$	0	0,174	0,342	0,500	0,643	0,766	0,866	0,940	0,985	1,000	—	—	—
II	$\sin^2\xi$	0	0,030	0,117	0,250	0,413	0,587	0,750	0,882	0,970	1,000	—	—	—
III	$l_{d_m}\sin^2\xi$											—	—	—
IV	l											—	—	—
V	I : IV	(*)										Σ'	Попр.	Исправл. Σ

Плечи статической остойчивости определяются по диаграмме при таких углах крена, для которых плечи динамической остойчивости равны вычисленным в строке III табл. 7 (рис. 32). В клетке строки V, отмеченной знаком (*) при угле $\xi = 0$ записывается величина, определяемая по выражению (120). Числа строки V суммируются по

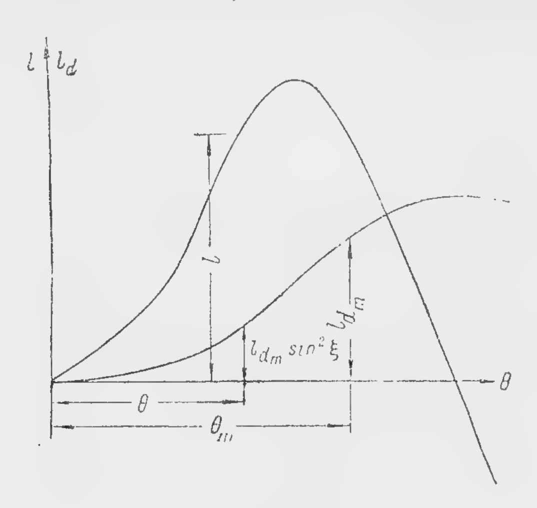


Рис. 32.

правилу трапеций. Величина периода качки на тихой воде при амплитуде θ_m определяется по формуле:

$$T = 4\sqrt{2\frac{A_1}{D}}\sqrt{l_{d_m}} \cdot 0{,}174 \sum . \tag{121}$$

Частота качки на тихой воде при амплитуде θ_m равна

$$n_0 = \frac{2\pi}{T} . \tag{122}$$

Отношение частоты n_θ к частоте боковой качки n_0 на тихой воде при весьма малой амплитуде ее равно:

$$\nu = \frac{n_\theta}{n_0} = \frac{2}{\pi}\sqrt{2(r-a)\,l_{d_m}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin\xi\, d\xi}{l} \tag{123}$$

или с учетом табл. 7:

$$\nu = \frac{1}{9}\sqrt{2(r-a)\,l_{d_m}} \cdot \sum , \tag{124}$$

где $\sum$ — исправленная сумма в последней графе нижней строк табл. 7.

Описанный способ Г. Е. Павленко принципиально точен, но не может быть применен для диаграммы остойчивости с нулевой начальной метацентрической высотой.

В. Г. Власов предложил следующий способ для приближенного определения периода боковой качки судна по заданной диаграмме остойчивости. Пусть на рис. 33 задана диаграмма статической остойчивости и θ_0 — известная амплитуда качки. Из начала координат проводится линия OB таким образом, чтобы заштрихованные площади были равны. Далее определяется отрезок $AD = l_{ср}$ по формуле:

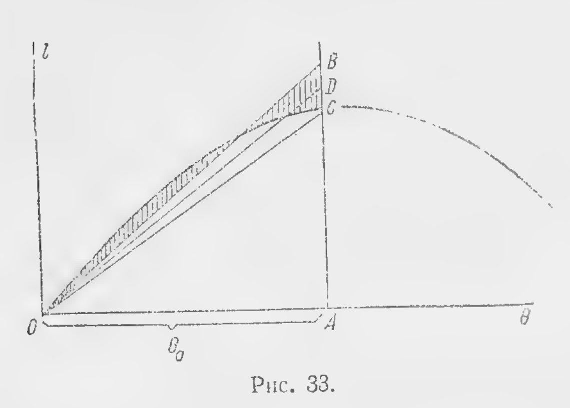


Рис. 33.

$$l_{ср} = \frac{1}{2}(\overline{AB} + \overline{AC}).$$

Приближенное значение периода качки определится по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A_1 \theta_0}{D l_{ср}}}. \tag{125}$$

Предел относительной ошибки вычисленного по формуле (125) значения периода определяется неравенством:

$$\frac{T_0 - T}{T} < \frac{\overline{AB} - \overline{AD}}{4\overline{AC}}. \tag{126}$$

Более точно величина периода может быть определена, если угол начального отклонения θ_0 разделен на две части:

$$\theta_0 = \theta_1 + \theta_2.$$

Для этого проводятся ординаты $\overline{AC}$ и $\overline{HG}$ (рис. 34) и наклонные OB и CE так, чтобы заштрихованные площади были равны. Далее определяются средние значения плеч:

$$l_{1ср} = \frac{l_1' + l_1}{2} \quad \text{и} \quad l_{0ср} = \frac{l_0' + l_0}{2},$$

где

$$l_1 = \overline{AC}; \quad l_1' = \overline{AB}; \quad l_{1ср} = \overline{AD},$$

$$l_0' = \overline{HE}; \quad l_0 = \overline{HG}; \quad l_{0ср} = \overline{HF}.$$

Период определится по формуле:

для $l_0 > l_1$

$$T = 4\left[\sqrt{\frac{A_1\theta_1}{Dl_{1ср}}} \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\theta_1} + \sqrt{\frac{A_1(\theta_0 - \theta_1)}{D\Delta l_{ср}}} \arccos \frac{l_1}{l_{0\,ср}}\right], \tag{127}$$

для $l_0 < l_1$

$$T = 4\left[\sqrt{\frac{A_1\theta_1}{Dl_{1\text{ср}}}}\,\operatorname{arctg}\frac{\alpha}{\theta_1} + \sqrt{\frac{A_1(\theta_0 - \theta_1)}{D\Delta l_{\text{ср}}}}\,\operatorname{Ar\,ch}\frac{l_1}{l_{0\text{ср}}}\right], \quad (128)$$

где $\Delta l_{\text{ср}} = l_{0\,\text{ср}} - l_1$,

$$\alpha = \sqrt{\frac{D\theta_1 l_{1\text{ср}}}{A_1}},$$

$$\dot{\theta}_1 = \sqrt{\frac{2D}{A_1}\int\limits_{\theta_1}^{\theta_0} l\,d\theta}.$$

Величина интеграла под корнем либо вычисляется по правилам приближенных квадратур, либо берется как разность плеч диаграммы динамической остойчивости:

$$\int\limits_{\theta_1}^{\theta_0} l\,d\theta = l_{d_0} - l_{d_1}, \quad (129)$$

где l_{d_0} и l_{d_1} — плечи динамической остойчивости при крене θ_0 и θ_1.

Для приближенного определения частоты качки с амплитудой θ_m может служить формула, предложенная Г. Е. Павленко:

$$n_m = \sqrt{\frac{D}{A_1}\frac{l(\theta_m)}{\theta_m}} \quad (130)$$

и соответственно период качки равен:

$$T = \frac{2\pi}{n_m}. \quad (131)$$

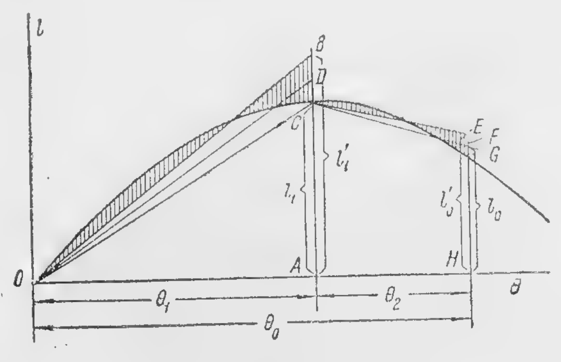


Рис. 34.

Если диаграмма остойчивости задана в виде параболы степени $2m+1$ по формуле:

$$l = (r - a)\sum_{k=0}^{k=m} b_{2k+1}\theta^{2k+1}, \quad (132)$$

или

$$l = (r - a)(b_1\theta + b_3\theta^3 + b_5\theta^5 + \ldots + b_{2m+1}\theta^{2m+1}), \quad (133)$$

то частота n_m бортовой качки на тихой воде с амплитудой θ_m может быть определена по приближенной формуле, полученной С. Н. Благовещенским:

$$n_m = \nu n_0, \quad (134)$$

где n_0 — частота качки на линейном участке диаграммы

$$n_0 = \sqrt{\frac{D(r-a)}{A_1}};$$

ν_m — функция от амплитуды качки, определяемая зависимостью

$$\nu_m^2 = \sum_{k=0}^{k=m} b_{2k+1}\left(\frac{\theta_m}{2}\right)^{2k}(2k+1)_k, \tag{135}$$

где $(2k+1)_k$ — биномиальные коэффициенты.

В частном случае для диаграммы остойчивости, заданной в виде параболы 7-го порядка, величина ν_m^2 равна

$$\nu_m^2 = 1 + \frac{3}{4}b_3\theta_m^2 + \frac{5}{8}b_5\theta_m^4 + \frac{35}{64}b_7\theta_m^6. \tag{136}$$

Практический метод определения частот качки на тихой воде разработан Г. М. Хорошанским. Описание этого метода приведено в § 10.

§ 10. РАСЧЕТ АМПЛИТУД КАЧКИ КОРАБЛЯ НА ПРАВИЛЬНОМ ВОЛНЕНИИ С УЧЕТОМ ФОРМЫ ДИАГРАММЫ ОСТОЙЧИВОСТИ

Расчет бортовой качки на правильном волнении с учетом формы диаграммы остойчивости может быть выполнен, как и при линейной теории (§ 5), в абсолютных и относительных координатах.

Уравнение в абсолютных координатах может быть написано в виде:

$$A_1\ddot{\theta} + 2N\dot{\theta} + D(r-a)f(\theta) = D(r-a)f'(\theta)\,\alpha_m\cos(\sigma t + \gamma), \tag{137}$$

где через $f(\theta)$ обозначена функция $\frac{l}{r-a}$, характеризующая форму диаграммы остойчивости; $f'(\theta)$ — производная функции $f(\theta)$ по углу крена; прочие обозначения обычны (§ 5). При составлении уравнения (137) для простоты предположено, что инерция воды пропорциональна абсолютному угловому ускорению, а сопротивление воды — абсолютной угловой скорости качки. Оба допущения не вносят большой погрешности ввиду относительной малости присоединенной массы воды и сил сопротивления ее при боковой качке. Уравнение (137) было исследовано С. Н. Благовещенским в предположении, что диаграмма остойчивости задана в виде параболы.

В результате исследования было получено приближенное уравнение для определения наибольших амплитуд установившейся качки в условиях резонанса:

$$\nu = \frac{2\mu}{\alpha_m}\theta_m, \tag{138}$$

где обозначено, как обычно: θ_m — искомая амплитуда качки;

$$2\mu = \frac{2N}{\sqrt{D(r-a)A_1}};$$

α_m — наибольший эффективный угол волнового склона.

Величина ν, стоящая в левой части уравнения (138), равна отношению:

$$\nu = \frac{n_\theta}{n_0} = \frac{T_0}{T_\theta}, \tag{139}$$

где T_0 и n_0 — период и частота качки на тихой воде при малых амплитудах, определяемые формулами (15) и (11); T_θ и n_θ — период и частота качки на тихой воде с амплитудой θ_m.

Уравнение (138) решается графически. Для этого по формулам, приведенным в § 9, определяются величины периода качки при нескольких (4—5) значениях амплитуд θ_m и соответствующих им значений ν. По данным расчета строится кривая $\nu = \nu(\theta_m)$, по оси абсцисс которой откладываются величины θ_m, а по оси ординат — величины относительных частот (рис. 35).

На этом же графике строится прямая $\frac{2\mu}{\alpha_m}\theta_m$, проходящая через начало координат с угловым коэффициентом $\frac{2\mu}{\alpha_m}$.

Абсцисса точки пересечения наклонной прямой с кривой ν равна искомой амплитуде θ_m резонансной качки. Частота возмущающей силы, вызывающей резонансную качку, приближенно равна

$$\sigma = n_\theta \cong \nu n_0, \tag{140}$$

где n_θ — частота, соответствующая амплитуде θ_m. Характер качки корабля близок к гармоническому и определяется приближенной зависимостью:

$$\theta \cong \theta_m \cos \sigma t. \tag{141}$$

Угол γ сдвига фазы между качкой корабля и изменением возмущающей силы в условиях резонанса близок к прямому углу

$$\gamma \cong \frac{\pi}{2}.$$

Рис. 35.

Если момент сил сопротивления качке определяется квадратичной зависимостью:

$$M(\dot{\theta}) = KA_1\dot{\theta}^2,$$

то амплитуда качки при резонансе не зависит от формы диаграммы остойчивости и определяется выражением

$$\theta_m = 1{,}09\sqrt{\frac{\alpha_m}{K}}. \tag{142}$$

Частота возмущающей силы равна при этом частоте качки на тихой воде при амплитуде θ_m. Приведенные соотношения получены

для случая качки на правильном волнении. Есть основания считать, что нарушение правильности волнения при условии, что угол эффективного склона волн не превысит α_m, должно привести к уменьшению амплитуд по сравнению с рассчитываемыми по формулам (138) или (142). Однако справедливость этого утверждения математически пока не доказана.

Уравнение качки в относительных координатах имеет вид:

$$A_1\ddot{\varphi} + 2N\dot{\varphi} + D(r - a)f(\varphi) = \alpha_m\sigma^2 A \sin \sigma t, \qquad (143)$$

где $\varphi = \theta - \alpha$; прочие обозначения те же, как в уравнении (136).

Уравнение (143) не содержит в правой части нелинейного члена, и потому решение его значительно проще при более точной структуре. Ниже излагается метод расчета качки, основанный на решении уравнения (143) и разработанный Г. М. Хорошанским.

Разделением всех коэффициентов на A_1 оно приводится к виду:

$$\ddot{\varphi} + 2h\dot{\varphi} + n_0^2 f(\varphi) = \alpha_m\sigma^2 k \sin \sigma t. \qquad (144)$$

Колебательное движение корабля при установившемся режиме качки определяется выражением:

$$\varphi = \varphi_m \sin(\sigma t + \gamma) + F(\sigma t), \qquad (145)$$

где $F(\sigma t)$ — функция, содержащая сумму гармоник высшего порядка.

Расчеты показывают, что основной характер движения определяется первым членом выражения (145), функция же $F(\sigma t)$ представляет незначительную поправку. Поэтому для практически возможных амплитуд качки допустимо принимать

$$\varphi = \varphi_m \sin(\sigma t + \gamma). \qquad (146)$$

Величина φ_m удовлетворяет соотношению (69):

$$\varphi_m = \frac{k\alpha_m\sigma^2}{\sqrt{(n_m^2 - \sigma^2)^2 + 4h^2\sigma^2}}, \qquad (147)$$

где через n_m обозначена частота качки на тихой воде при амплитуде φ_m, так что n_m представляет функцию амплитуды.

Угол сдвига фазы между колебанием корабля и изменением возмущающей силы равен:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2h\sigma}{n_m^2 - \sigma^2}. \qquad (148)$$

Выражение (147) неудобно для расчетов, так как правая часть его зависит от амплитуды φ_m.

Путем решения его относительно σ и разделения членов его на n оно приводится к виду:

$$x^2 = \frac{\nu^2 - 2\mu^2}{1 - \left(\frac{k\alpha_m}{\varphi_m}\right)^2} \mp \sqrt{\left[\frac{\nu^2 - 2\mu^2}{1 - \left(\frac{k\alpha_m}{\varphi_m}\right)^2}\right]^2 - \frac{\nu^4}{1 - \left(\frac{k\alpha_m}{\varphi_m}\right)^2}}, \quad (149)$$

где обозначено $x = \frac{\sigma}{n_0}$; $\mu = \frac{h}{n_0}$; $\nu = \frac{n_m}{n_0} = \frac{T}{T_\varphi}$.

Выражение (149) может служить для построения резонансного графика $\varphi_m = f(x)$. Для этого предварительно необходимо для заданной диаграммы остойчивости построить кривую $\nu = f(\varphi_m)$, вычислив

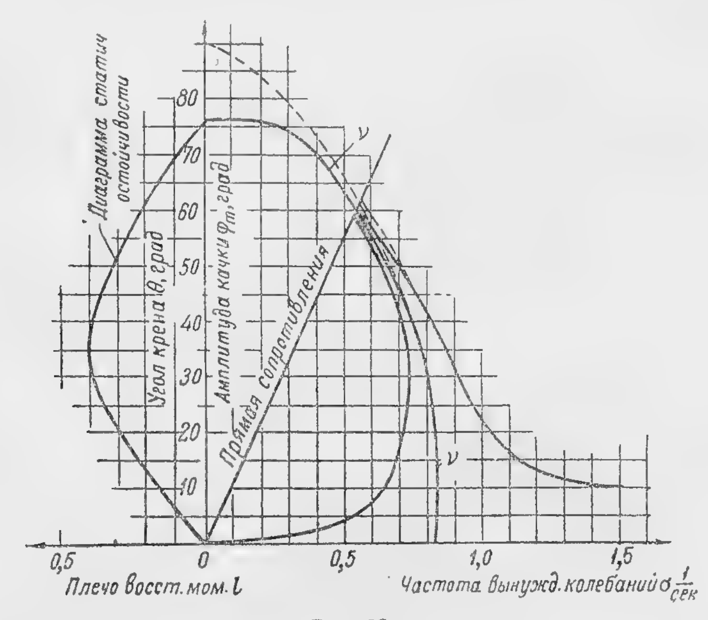


Рис. 36.

по способам, описанным в § 9, значения T_φ при различных φ_m, рассматривая φ_m, как амплитуды качки θ_m на тихой воде. Для построения кривой ν по вертикальной оси откладываются величины амплитуд φ_m, а по горизонтальной — соответствующие им значения $\nu = \frac{T_0}{T_\varphi}$.

Кривая, соединяющая построенные таким образом точки, носит название кривой относительных частот свободных колебаний.

Задаваясь величинами φ_m, можно по кривой относительных частот определять соответствующие им ν и, подставив их в выражение (149), можно рассчитать соответствующие им x. Наличие двух знаков перед корнем свидетельствует о наличии двух ветвей резонансного графика — восходящей и нисходящей. При значениях амплитуд φ_m, обращающих подкоренное выражение (149) в нуль, обе ветви сходятся, образуя максимум, соответствующий резонансному пику. Вид резо-

нансного графика, вычисляемого по выражению (149), показан на рис. 36. Максимальные амплитуды качки при резонансе определяются приближенным уравнением, аналогичным полученному ранее С. Н. Благовещенским в абсолютных координатах:

$$\frac{2\mu}{k\alpha_m}\varphi_m = \nu. \tag{150}$$

На рис. 36 построена прямая $\frac{2\mu}{k\alpha_m}\varphi_m$, точка пересечения которой с кривой ν определяет координаты (амплитуду и частоту) резонансного пика.

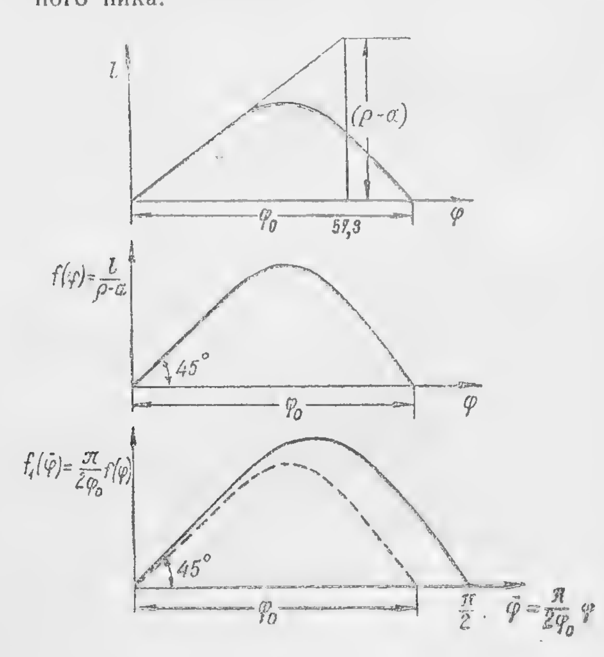


Рис. 37.

На основе полученных зависимостей Г. М. Хорошанским разработан упрощенный практический способ расчета частот и амплитуд качки. Для расчета по этому способу заданная диаграмма остойчивости предварительно перестраивается в безразмерных величинах так, чтобы тангенс угла наклона касательной к кривой в начале координат был равен единице, а угол заката диаграммы был равен $\frac{\pi}{2}$.

Для этой цели плечи остойчивости делятся на начальную метацентрическую высоту (рис. 37):

$$f(\varphi) = \frac{l}{r - a}, \tag{151}$$

где через φ обозначен угол наклонения. Затем по оси абсцисс откладываются приведенные углы крена, определяемые по формуле

$$\bar{\varphi} = \frac{\pi}{2}\,\frac{\varphi_i}{\varphi_0}, \tag{152}$$

а по оси ординат функция от $\bar{\varphi}$

$$f(\bar{\varphi}) = f(\varphi)\,\frac{\pi}{2\varphi_0}, \tag{153}$$

где φ_0 — угол заката диаграммы остойчивости.

В результате получается безразмерная диаграмма остойчивости, имеющая угол наклона касательной в начале координат, равный 45°, и угол заката $\bar{\varphi}_0 = 90°$. Эта безразмерная диаграмма вычерчивается на

прозрачной кальке в таком же масштабе, как диаграммы на рис. 38—40.

Эта безразмерная диаграмма накладывается далее по очереди на чертежи диаграмм, приведенных на рис. 38—40, так, чтобы координатные оси при наложении совпадали. На этих чертежах нанесены 26 стандартных безразмерных диаграмм остойчивости, для которых Г. М. Хорошанским проведены предварительные расчеты. В результате последовательного наложения кальки с заданной безразмерной диаграммой на стандартные подбирается наиболее близкая к заданной стандартная диаграмма, и в дальнейшем расчет производится применительно к этой близкой стандартной диаграмме. Если же заданная диаграмма существенно отличается от просчитанных 26 диаграмм, то приводимыми ниже вспомогательными графиками и таблицами воспользоваться нельзя и расчет следует производить по общим формулам (149) и (150) с применением способов, описанных в § 9.

На рис. 41—44 приведены кривые относительных частот ν свободных колебаний, рассчитанных по способу В. П. Терских, для

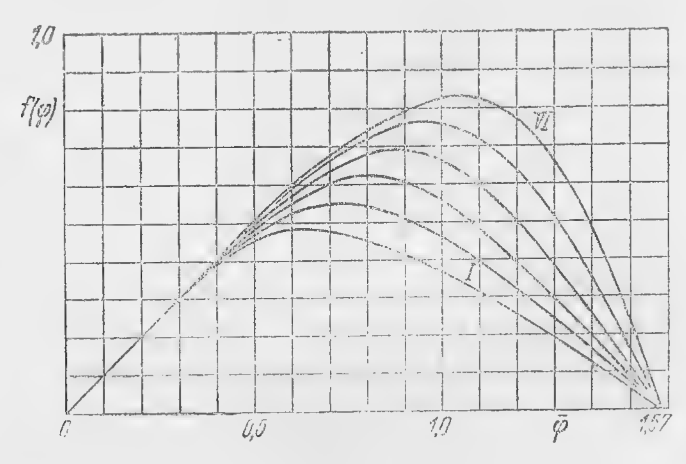


Рис. 38.

26 стандартных диаграмм остойчивости, а в таблицах, прилагающихся к рисункам, приведены табличные значения ν. Расчет кривой амплитуд производится по формуле:

$$\frac{1}{x^2} = \frac{1}{\nu^2} \mp \frac{k\bar{\alpha}_m}{\nu^2 \bar{\varphi}_m}, \tag{154}$$

где

$$\left.\begin{aligned} k = 1 - q = \frac{A}{A + \Delta A} \\ \bar{\alpha}_m = \frac{\pi}{2}\,\frac{\alpha_m}{\varphi_0} \\ \bar{\varphi}_m = \frac{\pi}{2}\,\frac{\varphi_m}{\varphi_0} \end{aligned}\right\} \tag{155}$$

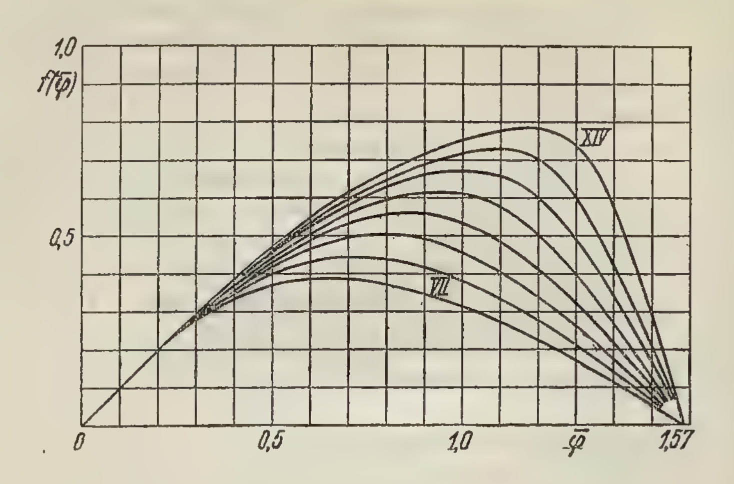

1,0
f(φ̄)
0,5
XIV
VII
0
0,5
1,0
φ̄
1,57

Рис. 39.

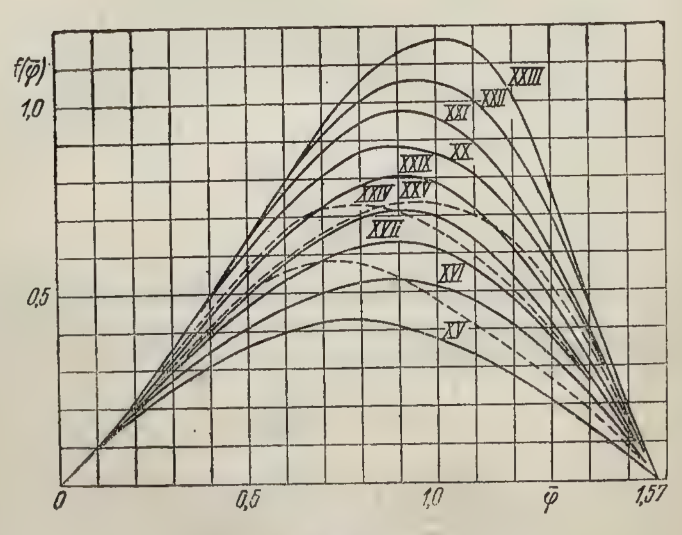

f(φ̄)
1,0
0,5
XXIII
XXII
XXI
XX
XXIX
XXIV
XXV
XVII
XVI
XV
0
0,5
1,0
φ̄
1,57

Рис. 40.

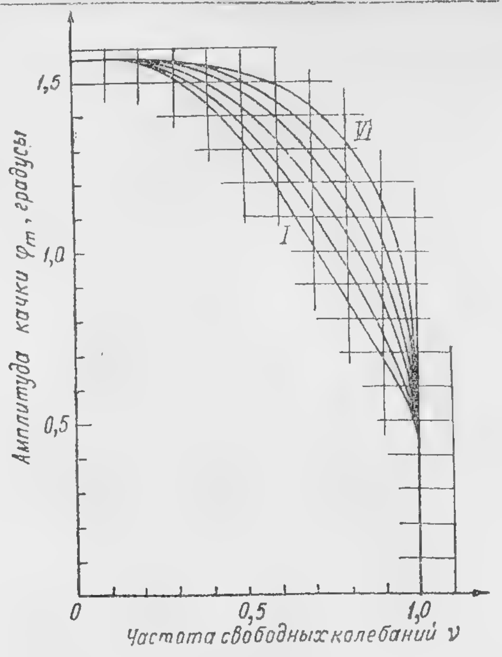


Рис. 41.

$\bar{\varphi}_m$	ν					
	I	II	III	IV	V	VI
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,995	0,996	0,997	0,998	0,999	1,000
0,5	0,985	0,988	0,991	0,994	0,997	1,000
0,6	0,950	0,963	0,972	0,984	0,992	0,998
0,7	0,890	0,923	0,952	0,970	0,985	0,992
0,8	0,830	0,877	0,920	0,950	0,970	0,982
0,9	0,770	0,825	0,880	0,920	0,950	0,970
1,0	0,713	0,770	0,829	0,883	0,920	0,950
1,1	0,652	0,707	0,768	0,827	0,880	0,924
1,2	0,588	0,638	0,700	0,762	0,822	0,878
1,3	0,522	0,565	0,622	0,684	0,745	0,810
1,4	0,444	0,478	0,533	0,590	0,660	0,731
1,5	0,320	0,350	0,395	0,450	0,510	0,600

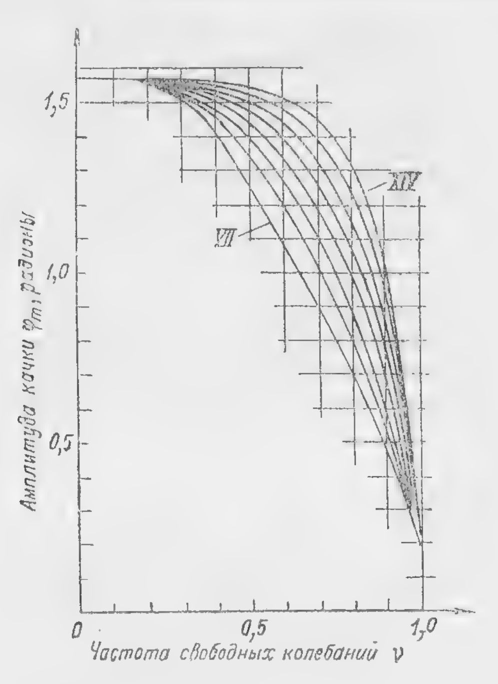


Рис. 42.

$\bar{\varphi}_m$	ν							
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	0,995	0,995	0,996	0,997	0,997	0,998	0,999	0,999
0,3	0,963	0,966	0,970	0,974	0,978	0,982	0,986	0,990
0,4	0,927	0,937	0,946	0,955	0,965	0,970	0,975	0,980
0,5	0,885	0,907	0,923	0,938	0,950	0,955	0,961	0,970
0,6	0,843	0,875	0,900	0,917	0,930	0,940	0,950	0,958
0,7	0,796	0,838	0,868	0,892	0,913	0,925	0,935	0,945
0,8	0,750	0,795	0,835	0,863	0,890	0,906	0,920	0,930
0,9	0,696	0,752	0,794	0,830	0,861	0,883	0,900	0,915
1,0	0,645	0,704	0,750	0,792	0,828	0,855	0,880	0,897
1,1	0,590	0,650	0,696	0,744	0,782	0,819	0,850	0,875
1,2	0,535	0,588	0,640	0,688	0,730	0,770	0,812	0,847
1,3	0,474	0,525	0,570	0,622	0,667	0,715	0,759	0,805
1,4	0,410	0,455	0,498	0,540	0,593	0,640	0,696	0,740
1,5	0,315	0,340	0,365	0,400	0,450	0,495	0,555	0,620

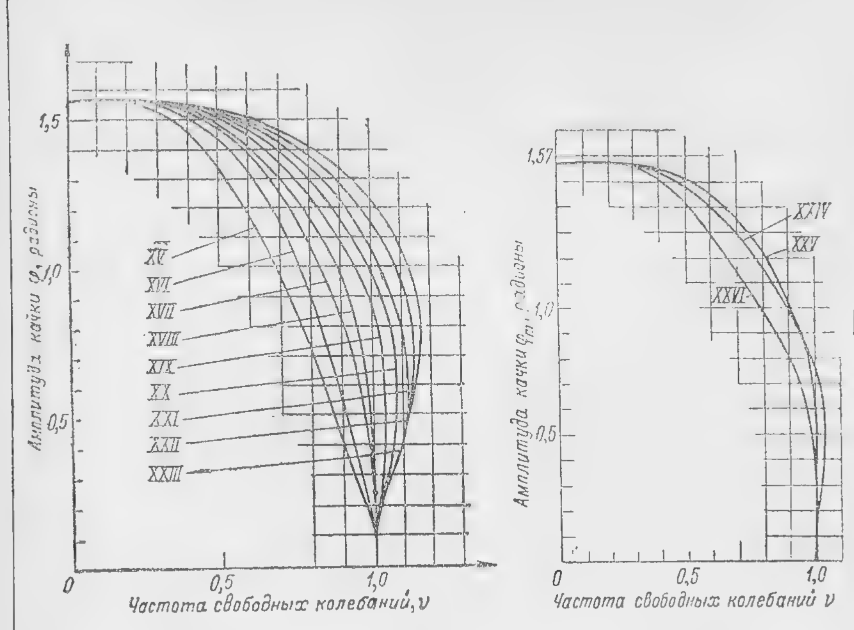


Рис. 43.

Рис. 44.

$\overline{\varphi}_m$	ν											
	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	0,969	0,980	0,999	1,000	1,007	1,014	1,021	1,021	1,021	1,010	1,001	1,000
0,3	0,935	0,956	0,992	1,000	1,025	1,045	1,056	1,056	1,056	1,025	1,004	1,000
0,4	0,900	0,934	0,982	1,000	1,035	1,068	1,092	1,092	1,092	1,037	1,007	0,997
0,5	0,868	0,908	0,971	0,990	1,035	1,075	1,113	1,120	1,120	1,040	1,005	0,988
0,6	0,836	0,882	0,956	0,982	1,033	1,075	1,118	1,139	1,140	1,037	1,000	0,973
0,7	0,805	0,859	0,936	0,968	1,030	1,073	1,113	1,141	1,159	1,015	0,933	0,940
0,8	0,770	0,834	0,911	0,950	1,018	1,061	1,096	1,136	1,162	0,983	0,976	0,905
0,9	0,733	0,805	0,875	0,925	0,990	1,036	1,065	1,117	1,150	0,942	0,942	0,846
1,0	0,692	0,770	0,838	0,891	0,950	0,990	1,029	1,084	1,118	0,891	0,905	0,786
1,1	0,640	0,727	0,790	0,840	0,895	0,938	0,980	1,030	1,080	0,835	0,865	0,721
1,2	0,585	0,677	0,737	0,770	0,827	0,878	0,920	0,960	1,029	0,770	0,815	0,655
1,3	0,522	0,616	0,667	0,699	0,745	0,798	0,835	0,875	0,935	0,694	0,745	0,587
1,4	0,453	0,541	0,582	0,606	0,648	0,696	0,722	0,770	0,808	0,600	0,657	0,514
1,5	0,356	0,410	0,460	0,490	0,517	0,540	0,565	0,595	0,620	0,468	0,505	0,409

Задаваясь значениями φ_m, можно вычислить соответствующие $\bar{\varphi}_m$ и по выражению (154) соответствующие x, равные, как обычно,

$$x = \frac{T_0}{\tau}.$$

По известным x и φ_m может быть построена кривая амплитуд. Положение резонансного пика определится путем построения, указанного применительно к решению (150).

Для облегчения расчета приводятся вспомогательные таблицы величин $\frac{1}{\nu^2}$ (табл. 8—10) и величин $\frac{1}{\nu^2 \varphi_m}$ (табл. 11—13), составленные Г. М. Хорошанским для 26 стандартных диаграмм.

Таблица 8

Квадраты безразмерных периодов нелинейной боковой качки

$\bar{\varphi}_m$	$1/\nu^2$					
	I	II	III	IV	V	VI
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	1,010	1,008	1,006	1,005	1,002	1,000
0,5	1,031	1,025	1,018	1,012	1,006	1,000
0,6	1,109	1,078	1,058	1,033	1,016	1,005
0,7	1,262	1,174	1,103	1,063	1,031	1,016
0,8	1,451	1,300	1,182	1,110	1,063	1,037
0,9	1,686	1,470	1,293	1,183	1,110	1,063
1,0	1,970	1,686	1,456	1,282	1,183	1,110
1,1	2,354	2,000	1,695	1,462	1,292	1,172
1,2	2,893	2,457	2,040	1,723	1,480	1,297
1,3	3,670	3,135	2,585	2,139	1,802	1,525
1,4	5,075	4,375	3,520	2,875	2,295	1,873
1,5	9,770	8,170	6,410	4,940	3,845	2,780

Амплитуда абсолютных наклонений корабля при бортовой качке может быть определена по формуле:

$$\theta_m = \sqrt{\alpha_m^2 + \varphi_m^2 + 2\alpha_m \varphi_m \cos \gamma}. \tag{156}$$

В случае резонанса величина абсолютной амплитуды равна:

$$\theta_m = \sqrt{\alpha_m^2 + \varphi_m^2}. \tag{157}$$

Ход расчета поясняется численным примером.

Таблица 9

Квадраты безразмерных периодов нелинейной боковой качки

$\bar{\varphi}_m$	$1/\nu^2$							
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,3	1,079	1,072	1,063	1,054	1,045	1,037	1,029	1,020
0,4	1,165	1,140	1,117	1,097	1,075	1,063	1,053	1,042
0,5	1,277	1,215	1,174	1,136	1,109	1,097	1,082	1,063
0,6	1,407	1,305	1,235	1,190	1,156	1,132	1,110	1,090
0,7	1,577	1,425	1,330	1,257	1,200	1,168	1,145	1,120
0,8	1,778	1,582	1,435	1,343	1,263	1,219	1,182	1,156
0,9	2,065	1,770	1,588	1,452	1,350	1,282	1,235	1,195
1,0	2,403	2,020	1,778	1,595	1,460	1,370	1,293	1,243
1,1	2,875	2,368	2,065	1,807	1,635	1,490	1,385	1,305
1,2	3,490	2,892	2,442	2,112	1,876	1,686	1,517	1,395
1,3	4,450	3,628	3,078	2,585	2,249	1,956	1,737	1,545
1,4	5,950	4,830	4,030	3,439	2,845	2,442	2,065	1,825
1,5	9,470	8,660	7,510	6,250	4,940	4,085	3,250	2,600

Таблица 10

Квадраты безразмерных периодов нелинейной боковой качки

$\bar{\varphi}_m$	$1/\nu^2$											
	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
0,05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,2	1,065	1,042	1,002	1,000	0,987	0,972	0,960	0,960	0,960	0,980	0,998	1,000
0,3	1,145	1,095	1,016	1,000	0,952	0,916	0,897	0,897	0,897	0,952	0,992	1,000
0,4	1,235	1,147	1,037	1,000	0,934	0,876	0,839	0,839	0,839	0,930	0,987	1,006
0,5	1,328	1,212	1,060	1,020	0,934	0,866	0,806	0,797	0,797	0,924	0,990	1,025
0,6	1,431	1,285	1,095	1,037	0,936	0,866	0,800	0,771	0,770	0,930	1,000	1,056
0,7	1,543	1,355	1,142	1,067	0,943	0,868	0,806	0,768	0,744	0,971	1,014	1,132
0,8	1,687	1,437	1,205	1,110	0,964	0,888	0,833	0,775	0,741	1,035	1,050	1,221
0,9	1,862	1,543	1,306	1,168	1,020	0,931	0,881	0,802	0,756	1,126	1,127	1,397
1,0	2,088	1,687	1,425	1,260	1,108	1,020	0,944	0,851	0,800	1,260	1,221	1,618
1,1	2,443	1,890	1,603	1,417	1,248	1,137	1,042	0,943	0,858	1,435	1,337	1,924
1,2	2,925	2,181	1,842	1,687	1,462	1,297	1,182	1,085	0,944	1,686	1,507	2,330
1,3	3,670	2,636	2,249	2,050	1,802	1,570	1,435	1,306	1,145	2,078	1,803	2,900
1,4	4,870	3,415	2,952	2,720	2,380	2,065	1,920	1,687	1,532	2,778	2,320	3,790
1,5	7,890	5,950	4,725	4,170	3,740	3,430	3,135	2,825	2,600	4,570	3,920	5,980

Таблица 11

Вспомогательные функции к расчету амплитуд вынужденных колебаний при боковой качке на волнении

φ_m	$\frac{1}{\nu^2\varphi_m}$					
	I	II	III	IV	V	VI
0,05	20	20	20	20	20	20
0,1	10	10	10	10	10	10
0,2	5	5	5	5	5	5
0,3	3,334	3,334	3,334	3,334	3,334	3,334
0,4	2,525	2,520	2,515	2,512	2,505	2,500
0,5	2,063	2,050	2,036	2,025	2,012	2,000
0,6	1,848	1,797	1,765	1,722	1,694	1,675
0,7	1,803	1,677	1,577	1,518	1,473	1,452
0,8	1,815	1,625	1,478	1,387	1,330	1,297
0,9	1,874	1,633	1,436	1,314	1,233	1,182
1,0	1,970	1,686	1,456	1,282	1,183	1,110
1,1	2,140	1,818	1,540	1,330	1,175	1,065
1,2	2,410	2,048	1,700	1,435	1,233	1,081
1,3	2,825	2,410	1,990	1,645	1,386	1,173
1,4	3,625	3,125	2,515	2,054	1,638	1,338
1,5	6,510	5,440	4,275	3,294	2,565	1,854

Таблица 12

Вспомогательные функции к расчету амплитуд вынужденных колебаний при боковой качке на волнении

$\overline{\varphi}_m$	$\frac{1}{\nu^2\varphi_m}$							
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
0,05	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
0,1	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
0,15	6,670	6,670	6,670	6,670	6,670	6,670	6,670	6,670
0,2	5,050	5,050	5,050	5,050	5,060	5,070	5,080	5,090
0,3	3,600	3,575	3,545	3,515	3,485	3,460	3,430	3,400
0,4	2,912	2,850	2,792	2,740	2,688	2,660	2,635	2,605
0,5	2,555	2,430	2,350	2,274	2,220	2,195	2,165	2,126
0,6	2,345	2,175	2,058	1,983	1,927	1,887	1,850	1,817
0,7	2,253	2,035	1,900	1,795	1,715	1,670	1,636	1,600
0,8	2,223	1,978	1,795	1,680	1,580	1,525	1,478	1,445
0,9	2,295	1,967	1,765	1,613	1,500	1,425	1,373	1,328
1,0	2,403	2,020	1,778	1,595	1,460	1,370	1,293	1,243
1,1	2,615	2,152	1,878	1,643	1,485	1,355	1,259	1,186
1,2	2,910	2,410	2,035	1,760	1,563	1,405	1,265	1,163
1,3	3,425	2,790	2,368	1,990	1,730	1,505	1,335	1,188
1,4	4,250	3,450	2,880	2,450	2,030	1,745	1,475	1,303
1,5	6,310	5,780	5,010	4,165	3,295	2,724	2,167	1,733

Таблица 13

Вспомогательные функции к расчету амплитуд вынужденных колебаний при боковой качке на волнении

$\bar{\varphi}_m$	$\frac{1}{\nu^2 \varphi_m}$											
	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI
0,05	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
0,1	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
0,2	5,325	5,210	5,010	5,000	4,940	4,860	4,800	4,800	4,800	4,900	4,990	5,000
0,3	3,816	3,650	3,386	3,334	3,175	3,055	2,990	2,990	2,990	3,175	3,310	3,334
0,4	3,088	2,868	2,593	2,500	2,336	2,190	2,100	2,100	2,100	2,325	2,470	2,515
0,5	2,657	2,425	2,120	2,040	1,870	1,733	1,612	1,595	1,595	1,850	1,982	2,050
0,6	2,385	2,142	1,825	1,728	1,560	1,444	1,334	1,285	1,283	1,550	1,667	1,760
0,7	2,205	1,936	1,631	1,525	1,348	1,240	1,152	1,097	1,063	1,387	1,450	1,617
0,8	2,110	1,797	1,507	1,387	1,205	1,110	1,041	0,969	0,926	1,294	1,313	1,527
0,9	2,070	1,715	1,451	1,298	1,133	1,035	0,979	0,891	0,840	1,251	1,252	1,552
1,0	2,088	1,687	1,425	1,260	1,108	1,020	0,944	0,851	0,800	1,260	1,221	1,618
1,1	2,220	1,718	1,458	1,288	1,135	1,033	0,947	0,857	0,780	1,305	1,215	1,750
1,2	2,438	1,818	1,535	1,406	1,218	1,080	0,985	0,904	0,787	1,405	1,255	1,942
1,3	2,825	2,029	1,730	1,577	1,386	1,208	1,104	1,005	0,881	1,599	1,387	2,230
1,4	3,480	2,440	2,110	1,943	1,700	1,476	1,372	1,205	1,095	1,985	1,657	2,708
1,5	5,260	3,970	3,150	2,780	2,495	2,288	2,090	1,885	1,734	3,050	2,615	3,990

Пусть рассматриваемый корабль имеет следующие данные:

Водоизмещение . . . . $D = 900$ *т*
Частота качки на тихой воде при малых амплитудах . . . . $n = 0{,}837$ сек.$^{-1}$
Начальная метацентрическая высота . . . . $r - a = 0{,}83$ *м*
Угол заката диаграммы остойчивости . . . . . $\varphi_0 = 76°$

Диаграмма остойчивости корабля приведена на рис. 45, причем она послужила в качестве исходной при построении XXVI стандартной диаграммы.

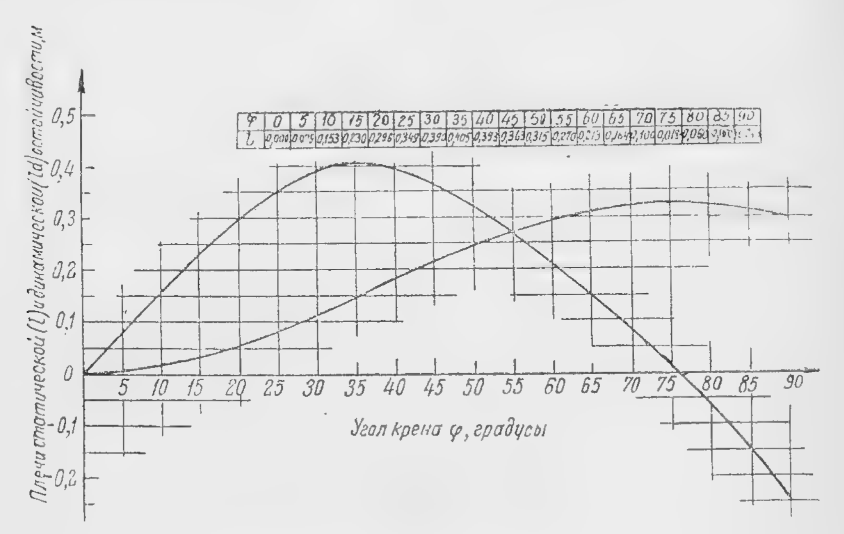


Рис. 45.

По формулам (151)—(153) в табл. 14 определяются величины $\bar{\varphi}$ и $f(\bar{\varphi})$.

Таблица 14

φ_i градусы	10	20	30	35	40	50	60	70	76
φ_i радианы	0,174	0,349	0,523	0,611	0,698	0,872	1,047	1,221	1,325
l_i, *м*	0,153	0,296	0,390	0,405	0,393	0,315	0,213	0,100	0
$f(\varphi_i) = \dfrac{l_i}{r - a}$	0,184	0,357	0,470	0,488	0,474	0,380	0,257	0,120	0
$\bar{\varphi}_i = \dfrac{\pi}{2} \dfrac{\varphi_i}{\varphi_0}$	0,207	0,415	0,620	0,724	0,827	1,033	1,241	1,447	1,57
$f(\bar{\varphi}_i) = \dfrac{\pi}{2\varphi_0} f(\varphi_i)$	0,218	0,423	0,557	0,578	0,562	0,450	0,305	0,142	0

На рис. 46 изображена диаграмма остойчивости в безразмерных координатах, которая должна быть построена на кальке в масштабе рис. 40. На рис. 46 вместе с расчетной изображены также близкие к ней стандартные диаграммы, которые подбираются путем наложения кальки на рис. 38—40.

Из рассмотрения рисунка следует, что расчетная диаграмма не совпадает ни с одной из двадцати пяти стандартных диаграмм, но что ближайшей к ней является кривая II. Последняя принимается за исходную. Значения ν, $\frac{1}{\nu^2}$ и $\frac{1}{\nu^2 \varphi_m}$ берутся из соответствующих таблиц.

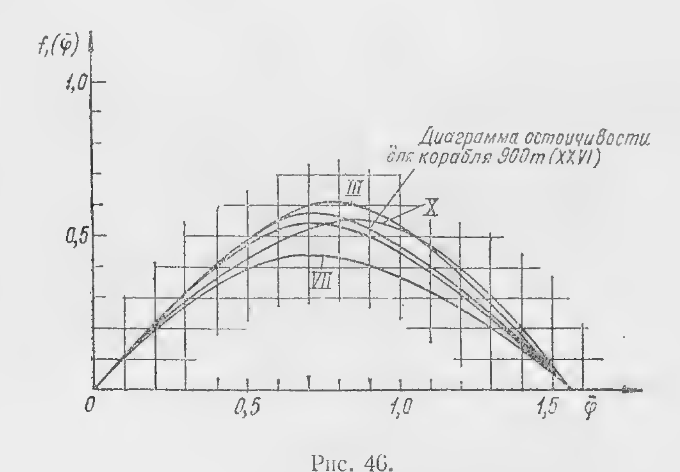


Рис. 46.

Пусть действующий угол волнового склона равен

$$\alpha_m = 6{,}75^\circ;$$

коэффициент присоединенного момента инерции:

$$q = \frac{\Delta A}{A + \Delta A} = 0{,}165,$$

откуда

$$k = 1 - q = 0{,}835.$$

Приведенный угол волнового склона

$$k\bar{\alpha}_m = \frac{\pi}{2} \frac{k\alpha_m}{\varphi_0} = \frac{90^\circ}{76^\circ} \frac{0{,}835 \cdot 6{,}75}{57{,}3} = 0{,}116.$$

Расчет производится в табл. 15. По данным последних четырех столбцов, на рис. 47 построены кривые амплитуд φ_m и свободных колебаний n_m. Для определения положения резонансного пика необходимо построить прямую сопротивления по формуле (150).

Таблица 15

$\bar{\varphi}_m$	$\frac{1}{\nu^2}$	$\frac{1}{\nu^2 \bar{\varphi}_m}$	$\frac{k\bar{\alpha}_m}{\nu^2 \bar{\varphi}_m} = 0{,}1163 \cdot \mathrm{III}$	$\frac{1}{x_1^2} = \mathrm{II} - \mathrm{IV}$	$\frac{1}{x_2^2} = \mathrm{II} + \mathrm{IV}$	x_1	x_2	$\sigma_1 = x_1 n$ сек.$^{-1}$	$\sigma_2 = x_2 n$ сек.$^{-1}$	ν	$n_m = \nu n$ сек.$^{-1}$	$\varphi_m = \bar{\varphi}_m \frac{2\varphi_0}{\pi}$ градусы
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
0,05	1,000	20,000	2,326	—	3,326	—	0,549	—	0,460	1,000	0,837	2,4
0,10	1,000	10,000	1,163	—	2,163	—	0,680	—	0,569	1,000	0,837	4,8
0,20	1,000	5,000	0,581	0,419	1,581	1,546	0,796	1,295	0,666	1,000	0,837	9,7
0,30	1,000	3,334	0,388	0,612	1,388	1,280	0,849	1,071	0,710	1,000	0,837	14,5
0,40	1,008	2,520	0,293	0,715	1,301	1,183	0,877	0,990	0,734	0,996	0,834	19,4
0,50	1,025	2,050	0,238	0,787	1,263	1,127	0,890	0,943	0,745	0,988	0,827	24,2
0,60	1,078	1,797	0,209	0,869	1,287	1,072	0,882	0,897	0,738	0,963	0,806	29,1
0,70	1,174	1,677	0,195	0,979	1,369	1,011	0,856	0,836	0,716	0,923	0,773	33,9
0,80	1,300	1,625	0,189	1,111	1,489	0,949	0,820	0,794	0,686	0,877	0,734	38,7
0,90	1,470	1,633	0,190	1,280	1,660	0,884	0,777	0,740	0,650	0,825	0,690	43,6
1,00	1,686	1,686	0,197	1,490	1,882	0,819	0,730	0,686	0,611	0,770	0,644	48,4
1,10	2,000	1,818	0,211	1,787	2,211	0,748	0,672	0,626	0,562	0,707	0,592	53,2
1,20	2,454	2,048	0,238	2,219	2,695	0,672	0,609	0,562	0,510	0,638	0,534	58,1

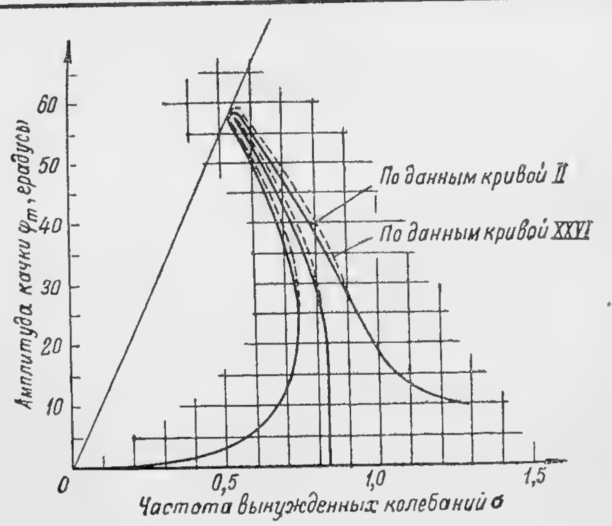


Рис. 47.

Пусть $h = 0{,}03$. Задаваясь $n_m = 0{,}5$, можно получить

$$\varphi_m = \frac{k\alpha_m}{2h} n_m = \frac{0{,}835 \cdot 6{,}75^\circ}{2 \cdot 0{,}03} \cdot 0{,}5 = 55{,}6^\circ.$$

Прямая сопротивления должна пройти через полученную точку и через начало координат. Точка пересечения этой прямой с кривой частот свободных колебаний определяет максимальную величину амплитуды качки.

В целях оценки погрешности, получающейся от несовпадения на рис. 46 действительной диаграммы со стандартной диаграммой II, на рис. 47 пунктиром нанесена амплитудная кривая для действительной диаграммы остойчивости, т. е. для диаграммы XXVI. Из рис. 47 следует, что кривые изменения амплитуд отличаются только в районе больших значений амплитуд качки, причем наибольшая величина расхождения не превосходит 2°.

Точность приближенного способа интегрирования диференциальных уравнений (137) и (143) была проверена путем выполнения ряда сравнительных расчетов численного интегрирования и экспериментов на механической установке, моделирующей уравнение (143).

Результаты сравнения показали практически достаточную точность при значениях амплитуд, близких к наклонениям, соответствующим максимуму диаграммы остойчивости и превышающих их. Для наклонений, близких к углу заката диаграммы остойчивости, точность способа не установлена.

ГЛАВА II

РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ СУДОВ

§ 11. ВЕРТИКАЛЬНАЯ И КИЛЕВАЯ КАЧКА КОРАБЛЯ НА ТИХОЙ ВОДЕ. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПЕРИОДА КАЧКИ

Для большинства судов вертикальная качка на тихой воде сопровождается килевой, и наоборот. Раздельное существование этих видов качки возможно лишь у таких судов, у которых центр тяжести площади ватерлинии лежит на одной вертикали с центром тяжести корабля. Обычно килевая и вертикальная качка возникает на волнении; на тихой воде эти виды качки могут возникать лишь в исключительных случаях, а возникнув, весьма быстро затухают.

Период вертикальной качки может быть определен по формуле

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{D + \Delta D}{g\gamma S}}. \qquad (158)$$

где D — водоизмещение корабля, *т*;
ΔD — вес присоединенной массы воды, *т*;
γ — объемный вес, *т/м*^{3};
S — площадь грузовой ватерлинии, *м*^{2};
g — ускорение силы тяжести, *м/сек*^{2}.

По приближенной формуле, могущей служить для ориентировочных расчетов, период вертикальной качки равен

$$T_3 \cong 2{,}4 \sqrt{T}, \qquad (159)$$

где T — осадка корабля.

Период килевой качки на тихой воде определяется формулой:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J + \Delta J}{D(R - a)}}, \qquad (160)$$

где J — момент инерции массы корабля относительно центральной поперечной оси;
ΔJ — момент инерции присоединенной массы воды;
R — продольный метацентрический радиус;
a — возвышение ЦТ корабля над ЦВ.

По весьма приближенной формуле период килевой качки равен:

$$T_2 \cong 2{,}4\sqrt{T}, \qquad (161)$$

где T — осадка корабля.

Периоды вертикальной и килевой качки для морских судов близки друг к другу по величине.

§ 12. РАСЧЕТ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАССЫ КОРАБЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОПЕРЕЧНОЙ ОСИ И СПОСОБЫ УЧЕТА ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ВОДЫ

Для вычисления момента инерции массы корабля может быть использована кривая распределения весов корабля по его длине .

$$J \cong 1{,}01 \int\limits_M x^2\,dM \cong 1{,}01 \sum x_i^2 \Delta m_i. \qquad (162)$$

Если известна ступенчатая кривая весов корабля по отсекам, то масса элементарного отсека равна: $\Delta m = \frac{\overline{Y}\,\Delta L}{g}$, где $\overline{Y}$ — ордината кривой весов. Следовательно, момент инерции равен:

$$J \cong \frac{1{,}01}{g} \sum_{i=1}^{i=n} x_i^2 \overline{Y}_i\,\Delta L; \qquad (163)$$

здесь ΔL — длина отсеков, принятых при построении ступенчатой кривой весов; x_i — абсцисса ЦТ отсеков кривой весов относительно ЦТ корабля.

Вычисления могут быть расположены по схеме, приведенной в табл. 16. Таблица составлена для случая разбивки кривой весов на $n = 20$ отсеков.

Весовое водоизмещение:

$$D = \Delta L \sum\nolimits_1.$$

Абсцисса центра тяжести корабля относительно мидель-шпангоута

$$x_g = \frac{1}{2}\Delta L \frac{\sum_2}{\sum_1}.$$

Момент инерции массы корабля

$$J = \frac{\Delta L^3}{4g} \sum\nolimits_3 - x_g^2 \frac{D}{g}. \qquad (164)$$

Если кривая весов неизвестна, то момент инерции может быть приближенно подсчитан по строевой по шпангоутам:

$$J = J_0 + \frac{1}{60} \frac{DL^2}{g}, \qquad (165)$$

Таблица 16

Пределы отсеков	Множители плеч	Ординаты кривой весов $\overline{Y}$	Произведение II · III	Произведение II · IV
I	II	III	IV	V
0—1	+19			
1—2	+17			
2—3	+15			
:	:			
8—9	+3			
9—10	+1			
10—11	—1			
11—12	—3			
12—13	—5			
:	:			
17—18	—15			
18—19	—17			
19—20	—19			
Суммы		Σ_1	Σ_2	Σ_3

где J_0 — момент инерции массы корабля в предположении, что ординаты кривой нагрузки пропорциональны ординатам строевой по шпангоутам

$$J_0 = \frac{\gamma}{g} \int_L x^2 \omega \, dx. \qquad (166)$$

Член $\frac{1}{60} \frac{DL^2}{g}$ соответствует наибольшей возможной ошибке от этого предположения.

Схема вычислений, отвечающих формуле (165), приведена в табл. 17, составленной применительно к правилу Чебышева для 9 ординат[1)].

Вычисление по формуле (165) дает удовлетворительный результат, если судно имеет грузы, разнесенные к оконечностям. Если же значительные грузы судна сосредоточены в средней его части, формула (165) может дать большую погрешность.

Для ориентировочного суждения о величине момента инерции массы корабля может служить приближенная формула:

$$J = 0{,}07 \frac{\alpha}{g} DL^2, \qquad (167)$$

где α — коэффициент полноты грузовой ватерлинии.

Для определения присоединенной массы воды предложено несколько способов, основанных на ряде упрощающих допущений.

---

1) См., также „Справочник по судостроению“, т. 3, стр. 53, табл. 15.

Таблица 17

Номера чебышевских сечений	Ординаты строевой ω, $м^2$		II + III	Отстояние ординаты от середины	V^2	IV · VI
	нос	корма				
I	II	III	IV	V	VI	VII
1—9				$0{,}912\frac{L}{2}$		
2—8				$0{,}601\frac{L}{2}$		
3—7				$0{,}529\frac{L}{2}$		
4—6				$0{,}168\frac{L}{2}$		
5				0	0	
				Сумма		Σ_1

$$J_0 = \frac{\gamma}{g}\frac{L}{g}\sum\nolimits_1 - \frac{D}{g}x_g^2$$

Влияние присоединенной массы воды на качку судна настолько значительно, что даже ориентировочный учет этого фактора должен привести к более точным результатам, нежели полное его игнорирование.

В Справочнике по судостроению т. 3 подробно описаны два метода расчета присоединенной массы — метод Льюиса и метод Локвуд Тейлора. Третий способ приводится в книге Павленко „Качка судов" и заключается в следующем.

Согласно этому способу, присоединенная масса, приходящаяся на погонный метр длины корабля, может быть определена формулой:

$$q = 0{,}85\frac{\pi}{2}\frac{\gamma}{g}Cy^2, \quad (168)$$

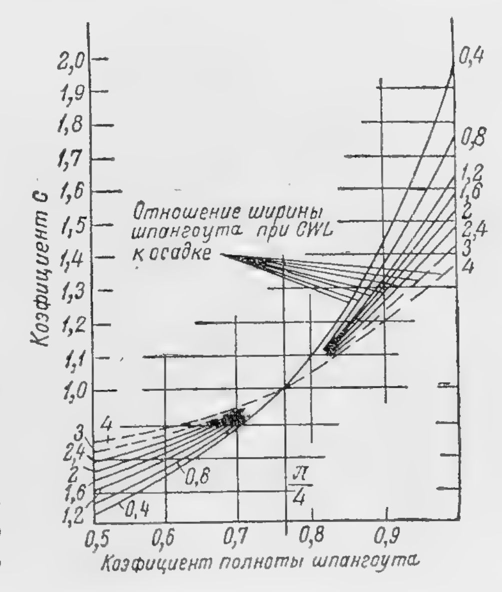


Рис. 48.

где y — ордината грузовой ватерлинии и C — коэффициент, зависящий от отношения ширины шпангоута по грузовой к его осадке и от коэффициента его полноты.

Значения C могут быть получены по графику (рис. 48), а при более приближенных подсчетах в среднем могут быть приняты равными единице. В этом случае значения q определяются формулой: $q = 0{,}136y^2$.

Полная величина присоединенной массы воды может быть определена по формуле:

$$\Delta M = \frac{\Delta D}{g} = \int_L q\,dx = 0{,}136\gamma \int_L Cy^2\,dx. \qquad (169)$$

Момент инерции присоединенной массы воды равен:

$$\Delta J = \int_L qx^2\,dx = 0{,}136\gamma \int_L Cx^2y^2\,dx. \qquad (170)$$

Схема вычисления присоединенной массы по формулам (169) и (170) приводится в табл. 18 (столбцы 25—31).

Для ориентировочных расчетов присоединенной массы воды могут служить приближенные формулы, предложенные Павленко:

$$\Delta M \cong 0{,}85\,\frac{\pi}{4}\,\frac{\gamma}{g}\,LB^2\,\frac{\alpha^2}{1+\alpha}, \qquad (171)$$

$$\Delta J \cong 0{,}055\,\frac{\gamma}{g}\,B^2L^3\,\frac{\alpha^2}{(3-2\alpha)(3-\alpha)}, \qquad (172)$$

где B — ширина корабля по грузовой;

L — его длина;

α — коэффициент полноты грузовой. Формулы (171) и (172) дают:

При $\alpha = 0{,}75$ $\quad \frac{\Delta D}{D} \approx 0{,}364\,\frac{B}{T} \quad \frac{\Delta J}{J} \approx 0{,}300\,\frac{B}{T}$;

$\alpha = 0{,}80$ $\quad \frac{\Delta D}{D} \approx 0{,}378\,\frac{B}{T} \quad \frac{\Delta J}{J} \approx 0{,}325\,\frac{B}{T}$;

$\alpha = 0{,}835$ $\quad \frac{\Delta D}{D} \approx 0{,}386\,\frac{B}{T} \quad \frac{\Delta J}{J} \approx 0{,}346\,\frac{B}{T}$.

Принимая во внимание условный характер определения присоединенной массы, можно по предложению Павленко для упрощения расчета допустить, что значения присоединенной массы на единицу длины корабля пропорциональны ординатам площади ватерлинии, т. е. принять, что

$$q = 2\frac{\Delta D}{gS}\,y, \qquad (173)$$

где S — площадь грузовой ватерлинии;

y — ордината ватерлинии в рассматриваемом сечении.

Момент инерции присоединенной массы воды в этом случае равен:

$$\Delta J = \int\limits_L q x^2\, dx = \frac{\Delta D}{gS}\, I_{gy}, \tag{174}$$

где $I_{gy} = 2\int x^2 y\, dx$ — момент инерции площади грузовой ватерлинии относительно поперечной оси, лежащей в вертикальной плоскости, которая проходит через центр тяжести g корабля.

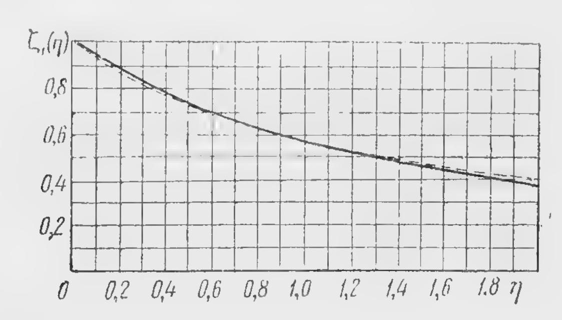


Рис. 49.

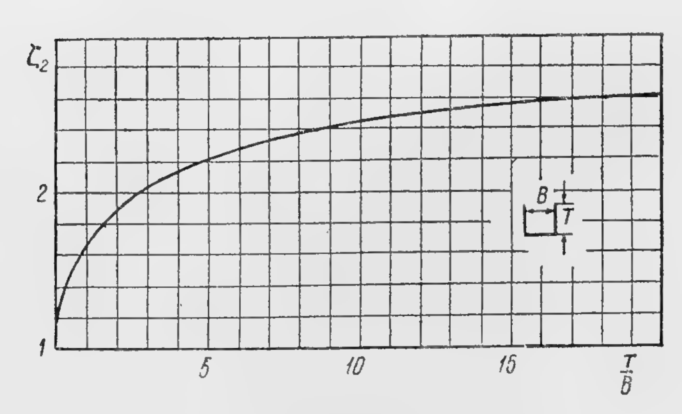


Рис. 50.

М. Д. Хаскинд рекомендует в практических расчетах применять следующие формулы для присоединенных масс при продольной качке на тихой воде:

$$\Delta M_0 = \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \rho \frac{\pi}{4} L B^2 \frac{\alpha^2}{1+\alpha}, \tag{175}$$

$$\Delta J_0 = \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \rho \frac{\pi}{48} L^3 B^2 \frac{\alpha^2}{(3-2\alpha)(3-\alpha)}, \tag{176}$$

где ζ_1 — поправочный коэффициент на конечное удлинение, определяемый по графику (рис. 49) в функции от отношения $\eta = \frac{B}{L}$;

ζ_2 — поправочный коэффициент на влияние осадки, определяемый по графику (рис. 50) в функции от отношения $\frac{T}{B}$;

ζ_3 — поправочный коэффициент на влияние килеватости днища, определяемый по графику (рис. 51);

ρ — массовая плотность воды.

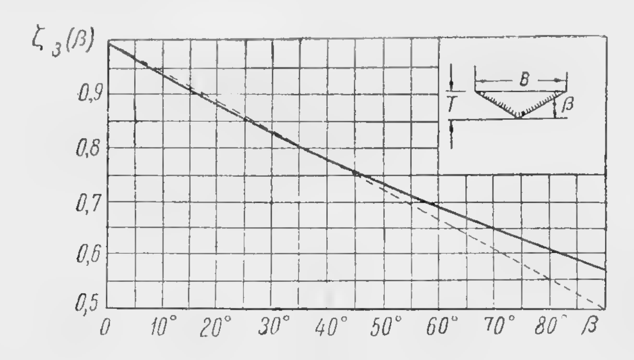


Рис. 51.

§ 13. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДЫ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ СУДОВ

Вопрос о сопротивлении воды продольной качке судов недостаточно изучен и приводимые ниже данные могут служить лишь для приближенных расчетов. При необходимости получения более точных данных рекомендуется проводить испытания моделей судов в бассейне.

Фан-дер-Флит рекомендует следующие приближенные формулы для учета сопротивления воды.

Сопротивление вертикальным колебаниям при квадратичной зависимости от скорости колебаний равно

$$R = 0{,}03S\dot{\zeta}^2. \qquad (177)$$

При расчете по линейной зависимости от скорости сила сопротивления воды может быть принята равной

$$R_1 = k_1 S\dot{\zeta}, \qquad (178)$$

где $k = 0{,}025\dot{\zeta}_0$, причем $\dot{\zeta}_0$ — максимальная скорость вертикальных колебаний.

При ходе судна вперед со скоростью v *м*/сек. сила сопротивления вертикальной качке может быть определена по формуле (178), причем коэффициент сопротивления k_1 равен

$$k_1 = 0{,}04v. \qquad (179)$$

Момент сил сопротивления при килевой качке может быть определен согласно Фан-дер-Флиту по следующей приближенной формуле:

$$M_R = \frac{3}{128} 10^{-2} B L^4 \dot{\psi}^2. \qquad (180)$$

Величина момента сопротивления килевой качке в предположении линейной зависимости от скорости может быть определена по формуле:

$$M_R = k_2 I_{gy} \dot{\psi}; \qquad (181)$$

здесь коэффициент k_2 равен:

$$k_2 = 0{,}002 \frac{BL^4}{I_{gy}} \dot{\psi}_0, \qquad (182)$$

где $\dot{\psi}_0$ — наибольшая угловая скорость килевой качки;

I_{gy} — момент инерции площади ватерлинии относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести g корабля.

При ходе судна со скоростью v *м*/сек. коэффициент k_2 сопротивления килевой качке по рекомендации Фан-дер-Флита равен:

$$k_2 \cong 0{,}03 v. \qquad (183)$$

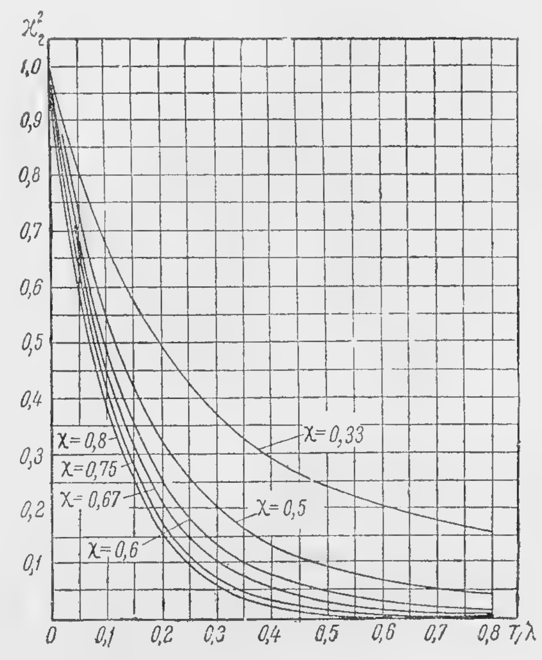


Рис. 52.

Ю. А. Шиманский рекомендует[1]) принимать в расчетах качки $k_1 = 0{,}05$ и $k_2 = 0{,}15$.

И. Г. Бубнов принимает для больших кораблей: $k_1 = k_2 = 0{,}18\, m \cdot м^{-3} \cdot$ сек.

Г. Е. Павленко также принимает одинаковые значения для коэффициента сопротивления при вертикальной и килевой качке и определяет величину его по формуле:

$$k = 2\mu_0 \sqrt{\frac{\gamma D}{gS}}, \qquad (184)$$

где μ_0 — относительный безразмерный коэффициент сопротивления, аналогичный коэффициенту μ при расчете боковой качки (см. выше, § 3).

---

[1]) Справочник по судостроению, т. 3, стр. 49.

На основании анализа опубликованных в литературе результатов опытов, Г. Е. Павленко рекомендует принимать при малых амплитудах качки $\mu_0 = 0{,}10$, а при значительных величинах амплитуд $\mu_0 = 0{,}225$.

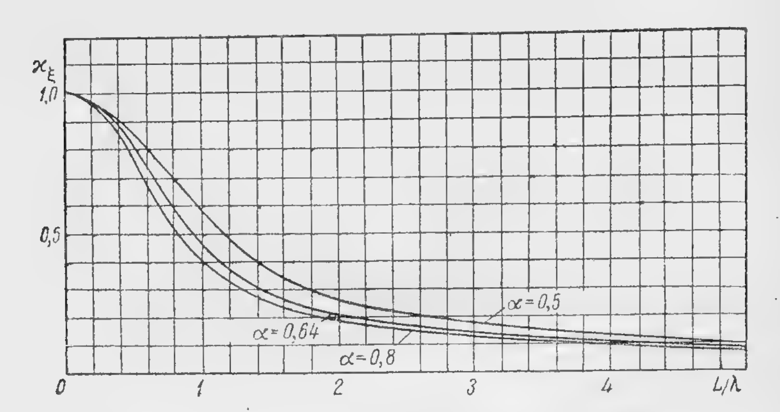


Рис. 53.

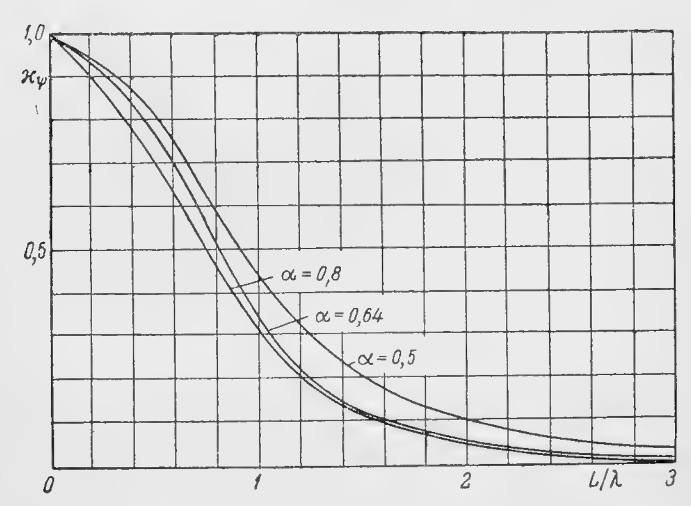


Рис. 54.

По исследованиям М. Д. Хаскинда, коэффициент сопротивления вертикальной качке без хода может быть определен приближенной зависимостью

$$kS = \frac{1}{2} \rho \sigma \frac{2\pi}{\lambda} S^2 \cdot \varkappa^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right) \cdot \varkappa \left(\frac{L}{\lambda}\right); \qquad (185)$$

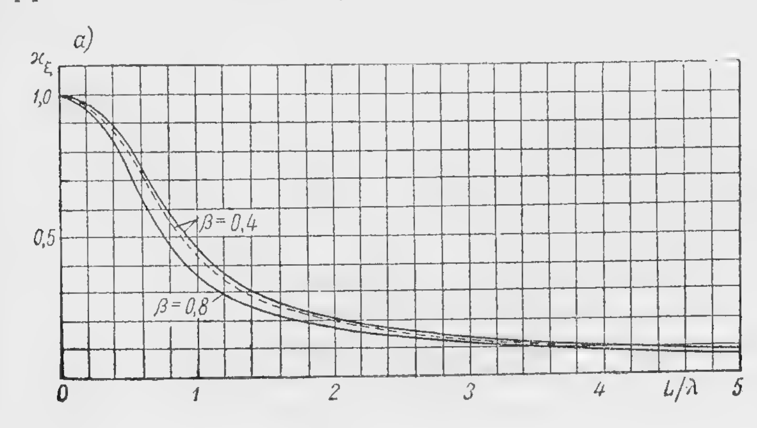
здесь $\rho = \frac{\gamma}{g}$ — массовая плотность воды;

σ — частота волны;

λ — длина волны;

S — площадь ватерлинии;

$\varkappa^2\left(\frac{T}{\lambda}\right)$ — коэффициент, определяемый по графику рис. 52, в функции от отношения $\frac{T}{\lambda}$, где T — осадка корабля; $\varkappa\left(\frac{L}{\lambda}\right)$ — коэффициент, определяемый по графикам рис. 53 в функции от отношения $\frac{L}{\lambda}$ и коэффициента полноты ватерлинии α.



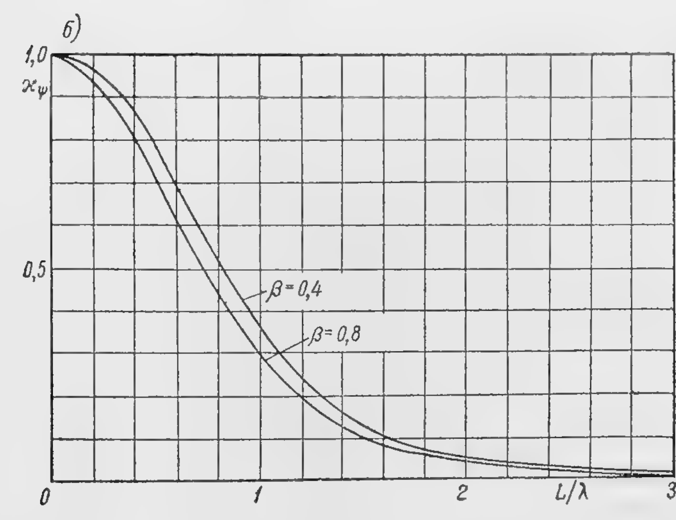


Рис. 55.

Коэффициент сопротивления килевой качке может быть определен следующей зависимостью:

$$kI_y = \frac{1}{4}\rho\sigma\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 I_y^2 \varkappa^2\left(\frac{T}{\lambda}\right)\varkappa_\psi\left(\frac{L}{\lambda}\right), \tag{186}$$

где I_y — момент инерции площади ватерлинии относительно поперечной оси, проходящей через мидель-шпангоут;

$\varkappa^2\left(\frac{T}{\lambda}\right)$ — коэффициент, определяемый по графику рис. 52;

$\varkappa_\psi\left(\frac{L}{\lambda}\right)$ — коэффициент, определяемый по графику рис. 54 в функции от отношения $\frac{L}{\lambda}$ и коэффициента полноты α.

При наличии значительной цилиндрической вставки, относительная длина которой $\beta = \frac{l}{L} \geqslant 0{,}4$, влияние формы и полноты ватерлинии на коэффициенты $\varkappa\left(\frac{L}{\lambda}\right)$ и $\varkappa_\psi\left(\frac{L}{\lambda}\right)$ становится несущественным. Величины этих коэффициентов могут быть определены в таком случае по графикам рис. 55, *а* и *б*.

Формулы (185) и (186) получены Хаскиндом для корабля, симметричного относительно мидель-шпангоута, с центром тяжести в плоскости миделя.

Рекомендуемые различными авторами формулы дают не одинаковые величины коэффициентов сопротивления. Однако при качке на волнении в условиях, далеких от резонанса, сопротивление мало влияет на величины амплитуд, и потому даже при ориентировочном учете сил сопротивления ошибка в величинах амплитуды будет невелика.

§ 14. СХЕМА РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ СУДНА НА ВОЛНЕНИИ ПО ТЕОРИИ акад. А. Н. КРЫЛОВА В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Приводимая ниже схема расчета продольной качки судна на волнении основана на следующих допущениях.

1. Присутствие судна не влияет на распределение гидродинамического давления в волне.
2. Волнение является установившимся, правильным, цилиндрическим и синусоидальным.
3. Диаметральная плоскость судна расположена перпендикулярно гребням волн.
4. Судно в пределах изменения ватерлинии прямостенно.
5. Отклонения судна от положения равновесия, а равно скорости и ускорения его малы, вследствие чего можно пренебречь степенями их выше 1-го порядка.
6. При расчете сил поддержания учитывается распределение гидродинамического давления в волне.
7. Силы сопротивления качке предполагаются пропорциональными первой степени скорости перемещения судна относительно колеблющегося уровня воды.
8. Добавочные силы инерции от присоединенной массы воды предполагаются пропорциональными ускорению судна относительно уровня поверхности воды.

Диференциальные уравнения продольной качки судна на волнении при высказанных допущениях принимают вид:

уравнение вертикальной качки

$$\frac{D+\Delta D}{g}\ddot{\zeta}+kS\dot{\zeta}+\gamma S\zeta+\frac{\Delta D}{g}l_1\ddot{\psi}+kSl\dot{\psi}+\gamma Sl\psi=a_0\cos\sigma t+b_0\sin\sigma t; \quad (187)$$

уравнение килевой качки:

$$(J+\Delta J)\ddot{\psi}+kI_{gy}\dot{\psi}+D(R_g-a)\psi+\frac{\Delta D}{g}l_1\ddot{\zeta}+kSl\dot{\zeta}+\gamma Sl\zeta=$$
$$=a_1\cos\sigma t+b_1\sin\sigma t. \quad (188)$$

Входящие в правые части уравнений (187) и (188) коэффициенты a_0, b_0, a_1, b_1 равны:

$$\left.\begin{aligned} a_0&=a_0'\mp b_0''-a_0''' \\ b_0&=\mp b_0'-a_0''\pm b_0''' \\ a_1&=a_1'\mp b_1''-a_1''' \\ b_1&=\mp b_1'-a_1''\pm b_1''' \end{aligned}\right\} \quad (189)$$

где верхние знаки принимаются при встречной волне, нижние — при попутной.

Постоянные $a-b$ имеют значения:

$$\left.\begin{aligned} a_0'&=2\gamma r\int_L\left(y-\frac{\omega}{2R}\right)\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\ b_0'&=2\gamma r\int_L\left(y-\frac{\omega}{2R}\right)\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\ a_1'&=2\gamma r\int_L\left(y-\frac{\omega}{2R}\right)x\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\ b_1'&=2\gamma r\int_L\left(y-\frac{\omega}{2R}\right)x\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \end{aligned}\right\} \quad (190)$$

здесь r — полувысота волны;

y — ордината ватерлинии в сечении с абсциссой x;

ω — площадь погруженной части шпангоута при осадке по грузовую с той же абсциссой;

λ — длина волны;

$R=\frac{\lambda}{2\pi}$ — радиус катящейся окружности трохоидальной волны;

γ — вес единицы объема воды.

Члены, выражаемые формулами (190), учитывают изменение силы поддержания при прохождении вдоль судна волны; величины $\frac{\omega}{2R}$ вводятся для учета распределения гидродинамического давления в волне.

Вторая категория постоянных $a - b$ имеет значения:

$$\left.\begin{aligned}
a_0'' &= 2kr\sigma \int\limits_L y \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
b_0'' &= 2kr\sigma \int\limits_L y \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
a_1'' &= 2kr\sigma \int\limits_L yx \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
b_1'' &= 2kr\sigma \int\limits_L yx \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx
\end{aligned}\right\} \qquad (191)$$

где σ — кажущаяся частота волны;

k — коэффициент сопротивления качке. Выражения (191) учитывают влияние скорости изменения уровня воды при волнении на силы сопротивления при качке.

Третья категория постоянных $a - b$ определяется выражениями:

$$\left.\begin{aligned}
a_0''' &= r\sigma^2 \int\limits_L q \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
b_0''' &= r\sigma^2 \int\limits_L q \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
a_1''' &= r\sigma^2 \int\limits_L qx \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx \\
b_1''' &= r\sigma^2 \int\limits_L qx \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx
\end{aligned}\right\} \qquad (192)$$

где q — присоединенная масса воды в сечении с абсциссой x, приходящаяся на 1 *м* длины судна. Выражения (192) учитывают влияние изменения уровня воды при прохождении волны на добавочные силы инерции при качке.

Прочие обозначения, принятые в уравнениях (187) и (188), имеют тот же смысл, как и в предшествующих параграфах настоящей главы, а именно: D — водоизмещение; $\frac{\Delta D}{g}$ — присоединенная масса воды; S — площадь грузовой ватерлинии; l — расстояние ЦТ площади ватерлинии от оси gz; ψ — угол отклонения при килевой качке (положительный при погружении носа); l_1 — расстояние ЦТ присоединенной массы воды от оси gz; J — момент инерции массы корабля относительно поперечной оси; ΔJ — момент инерции присоединенной массы воды относительно той же оси; I_{gy} — момент инерции площади ватерлинии относительно поперечной оси; a — возвышение центра тяжести корабля над центром величины.

Схема вычисления постоянных $a - b$, а также прочих величин, входящих в уравнения продольной качки, показана в табл. 18 с числен-

ным примером ее заполнения. Схема вычисления интегралов в этой таблице принята по правилу Чебышева с девятью ординатами, но, понятно, что могут быть применены и другие способы приближенного интегрирования.

Кажущаяся частота волны определяется выражением:

$$\sigma = \frac{2\pi}{\tau}, \tag{193}$$

где τ — кажущийся период волны, определяемый формулой:

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 \mp \frac{v}{c}}; \tag{194}$$

здесь τ_0 — истинный период волны; c — скорость ее бега; v — скорость хода судна. Согласно теории трохоидальных волн, $\tau_0 = 0{,}8\sqrt{\lambda}$; $c = v_в = 1{,}25\sqrt{\lambda}$ (см. § 4).

Если судно идет попутно волне, в выражении (194) ставится знак (—), если же навстречу волне, то ставится знак (+).

Вынужденные колебания, к которым сводится продольная качка на волнении, определяются частным решением уравнений (187) и (188), которые ищутся в форме:

$$\left.\begin{aligned} \zeta &= A\cos\sigma t + B\sin\sigma t \\ \psi &= \alpha\cos\sigma t + \beta\sin\sigma t \end{aligned}\right\} \tag{195}$$

Постоянные A, B, α, β определяются путем решения системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\left(\gamma S - \frac{D+\Delta D}{g}\sigma^2\right)A + kS\sigma B + \left(\gamma Sl - \frac{\Delta D}{g}l_1\sigma^2\right)\alpha + kSl\sigma\beta = a_0 \\ &kS\sigma A - \left(\gamma S - \frac{D+\Delta D}{g}\sigma^2\right)B + kSl\sigma\alpha - \left(\gamma Sl - \frac{\Delta D}{g}l_1\sigma^2\right)\beta = \pm b_0 \\ &\left(\gamma Sl - \frac{\Delta D}{g}l_1\sigma^2\right)A + kSl\sigma B + [D(R_g - a) - (J + \Delta J)\sigma^2]\alpha + kI_{gy}\sigma\beta = a_1 \\ &kSl\sigma A - \left(\gamma Sl - \frac{\Delta D}{g}l_1\sigma^2\right)B + kI_{gy}\sigma\alpha - [D(R_g - a) - (J + \Delta J)\sigma^2]\beta = \pm b_1 \end{aligned}\right\} \tag{196}$$

Знак (+) в правой части второго и четвертого уравнений ставится при наличии встречной волны, а знак (—) при попутной.

Система уравнений (196) канонична, что делает возможным применение к ее решению метода Гаусса.[1]) Кроме того, уравнения (196) во многих случаях могут быть весьма просто решены при помощи метода последовательных приближений. Для этого можно задаться в первом приближении значениями $\alpha = \beta = 0$ и, подставив эти значения в первую пару уравнений (196), найти оттуда неизвестные A и B в первом приближении. Найденные таким образом величины A

[1]) Справочник по судостроению, т. 1, стр. 251.

и B могут быть подставлены во вторую пару уравнений (196), из решения которой могут быть найдены значения α и β во втором приближении. Полученные значения α и β вновь подставляются в первую пару уравнений (196) и находятся величины A и B во втором приближении. Процесс вычислений продолжается до тех пор, пока результаты последнего приближения не окажутся близкими или равными результатам предыдущего приближения. Во многих случаях процесс получается быстро сходящимся и уже третье приближение дает достаточно верные результаты.

По найденным значениям A, B, α, β могут быть вычислены с помощью формул (195) и построены на чертеже положения судна для любого момента времени. Обычно вычисляют 8 положений судна через каждые 1/8 периода. Для этих же моментов времени вычисляются положения волны по формуле:

$$\zeta_{в} = d + r \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \pm \frac{t}{\tau} \right), \tag{197}$$

где d — возвышение начала абсолютных координат над поверхностью спокойной воды. Знак плюс перед членом $\frac{t}{\tau}$ в выражении (197) ставится в случае встречной волны, а знак минус — в случае попутной. В начальный момент времени предполагается, что подошва волны находится против начала координат. Чертеж положений судна, совмещенный с положениями волны, дает наглядное представление о поведении судна при продольной качке на рассматриваемом волнении.

Общая последовательность расчета продольной качки судна по изложенной схеме и применяемые табличные формы усматриваются из приводимого ниже численного примера.

§ 15. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ СУДНА НА ВОЛНЕНИИ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Основные элементы судна:

Длина по грузовой	$L = 49{,}10$ *м*
Ширина	$B = 9{,}00$ „
Осадка	$T = 3{,}68$ „
Водоизмещение весовое	$D = 936$ *т*
Возвышение ЦТ судна над килем	$Z_g = 3{,}69$ *м*

Чертеж чебышевских сечений показан на рис. 31.

Предполагается, что судно сидит без дифферента и идет навстречу волне со скоростью $v = 7$ узлов.

Длина волны принята равной длине судна

$$\lambda = L = 49{,}1 \text{ м}.$$

Высота волны определена по формуле (56):

$$2r = 0{,}17\lambda^{3/4} = 0{,}17 \cdot 49{,}1^{3/4} = 3{,}16 \text{ м}.$$

Таблица 18

Расчеты килевой качки

Номера чебышевских сечений	Коэффициенты Чебышева	Абсциссы шпангоутов относительно миделя x_1	Площади шпангоутов ω	ωx_1	Абсциссы шпангоутов относительно ЦТ судна x	Квадраты абсцисс шпангоутов x^2	ωx^2
		м	$м^2$	$м^3$	м	$м^2$	$м^4$
				(3) · (4)		$(6)^2$	(4) · (7)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,912	22,40	3,35	75,0	22,1	485,0	1625
2	0,601	14,76	18,75	275,8	14,46	209,0	3920
3	0,529	13,00	21,30	276,9	12,70	161,3	3440
4	0,168	4,13	27,50	113,6	3,83	14,7	403
5	0	0	27,90	0	— 0,30	0,1	3
6	0,168	—4,13	27,70	—114,3	— 4,43	19,6	543
7	0,529	—13,00	21,00	—273,0	—13,30	177,0	3717
8	0,601	—14,76	18,20	—268,6	—15,06	226,0	4115
9	0,912	—22,40	1,60	— 35,9	—22,70	515,3	825
			167,30	49,5			18591
			$\sum_1$	$\sum_2$			$\sum_3$

Исходные данные расчета

$L = 49{,}12$ м; $B = 9{,}00$ м; $T = 3{,}68$ м

$\Delta L = \frac{L}{9} = 5{,}46$ м; $a = 1{,}49$ м; $\gamma = 1{,}025$ т/м³

$v = 3{,}6$ м/сек.; $\lambda = 49{,}12$; $k = 0{,}18$ тм⁻³ сек.

$r = \frac{h}{2} = 0{,}085\,\lambda^{3/4} = 1{,}58$ м

$D = \gamma \Delta L \sum_1 = 936$ т

$x_c = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = 0{,}30$ м

$J = \frac{\gamma}{g} \Delta L \sum_3 + \frac{1}{60} \frac{DL^2}{g} = 14390$ т · м · сек.²

$S = 2\Delta L \sum_4 = 348$ м²

Номера чебышевских сечений	Ординаты ГВЛ y	xy	x^2y	$\frac{\omega}{2R}$	$y-\frac{\omega}{2R}$	$\varphi=360\frac{x}{\lambda}$	$\cos\varphi$
	м	*м*²	*м*⁴	*м*	*м*	град.	*м*
		(6)·(9)	(7)·(9)		(9)—(12)		
1	9	10	11	12	13	14	15
1	1,08	23,9	525	0,21	0,87	162,0	—0,951
2	3,82	55,2	800	1,20	2,62	106,0	—0,276
3	4,17	53,0	674	1,36	2,81	93,2	—0,055
4	4,50	17,3	66	1,76	2,74	28,1	0,881
5	4,50	— 1,3	0	1,78	2,72	— 2,2	0,999
6	4,50	—19,9	88	1,77	2,73	— 32,5	0,843
7	4,36	—58,1	772	1,34	3,02	— 97,6	—0,132
8	4,18	—63,1	947	1,16	3,02	—110,3	—0,346
9	0,75	—17,0	386	0,10	0,65	—166,3	—0,971
	31,86	—10,1	4259				
	$\sum_4$	$\sum_5$	$\sum_6$				

$$l=\frac{\Sigma_5}{\Sigma_4}=-0{,}32\ м$$

$$I_{gy}=2\,\Delta L\sum\nolimits_6=46420\ м^4$$

$$R_g=\frac{\gamma I_{gy}}{D}=50{,}8\ м$$

$$\tau=\frac{\tau_1}{1+\frac{v}{c}}=3{,}98\ сек.$$

$$\sigma=\frac{2\pi}{\tau}=1{,}58\ сек.^{-1}$$

$$a_0'=2\gamma r\,\Delta L\sum\nolimits_7=64{,}7\ т$$

$$b_0'=2\gamma r\Delta L\sum\nolimits_8=-11{,}7\ т$$

$$a_1'=2\gamma r\Delta L\sum\nolimits_9=44{,}7\ т\cdot м$$

$$b_1'=2\gamma r\Delta L\sum\nolimits_{10}=3100\ т\cdot м$$

Номера чебышевских сечений	$\sin\varphi$	$\left(y - \frac{\omega}{2R}\right)\cos\varphi$	$\left(y - \frac{\omega}{2R}\right)\sin\varphi$	$x\left(y - \frac{\omega}{2R}\right)\cos\varphi$	$x\left(y - \frac{\omega}{2R}\right)\sin\varphi$
		м	*м*	*м*	*м*
		(13) · (15)	(13) · (16)	(6) · (17)	(6) · (18)
1	16	17	18	19	20
1	0,309	—0,83	0,269	—18,50	5,94
2	0,961	—0,72	2,52	—10,45	36,40
3	0,998	—0,15	2,80	— 1,95	35,60
4	0,471	2,41	1,29	9,24	4,94
5	—0,038	2,72	—0,10	— 0,82	0,03
6	—0,537	2,30	—1,46	—10,20	6,49
7	—0,991	—0,40	—3,00	5,30	39,80
8	—0,938	—1,04	—2,83	15,66	42,62
9	—0,236	—0,63	—0,15	14,25	3,41
		3,66	—0,66	2,53	175,23
		$\sum_7$	$\sum_8$	$\sum_9$	$\sum_{10}$

$$a''_0 = 2\,kr\sigma\Delta L \sum\nolimits_{11} = 35{,}2\ m$$

$$b''_0 = 2\,kr\sigma\Delta L \sum\nolimits_{12} = -3{,}5\ m$$

$$a''_1 = 2\,kr\sigma\Delta L \sum\nolimits_{13} = 11{,}1\ m \cdot м$$

$$b''_1 = 2\,kr\sigma\Delta L \sum\nolimits_{14} = 1236\ m \cdot м$$

Номера чебышевских сечений	$y\cos\varphi$	$y\sin\varphi$	$xy\cos\varphi$	$xy\sin\varphi$	Коэффициент присоединенной массы C	Квадраты ординат ватерлинии y^2
	м	*м*	*м*^{2}	*м*^{2}		*м*^{2}
	(9) · (15)	(9) · (16)	(6) · (21)	(6) · (22)		$(9)^2$
1	21	22	23	24	25	26
1	—1,026	0,334	—22,7	7,4	0,71	1,17
2	—1,053	3,670	—15,23	53,0	0,90	14,59
3	—0,229	4,160	— 2,91	52,8	0,93	17,39
4	3,960	2,120	15,23	8,1	1,11	20,25
5	4,500	—0,171	— 1,35	0,1	1,13	20,25
6	3,790	—2,418	—16,76	10,7	1,12	20,25
7	— 0,576	—4,320	7,67	57,5	0,90	19,01
8	—1,450	—3,930	21,83	59,2	0,85	17,47
9	—0,728	—0,177	16,50	4,0	0,65	0,56
	7,190	—0,722	2,28	252,8		
	$\sum_{11}$	$\sum_{12}$	$\sum_{13}$	$\sum_{14}$		

$$a_0''' = 0{,}85\,\frac{\pi}{2}\,\frac{\gamma}{g}\,r\sigma^2\Delta L\sum\nolimits_{17} = 146{,}3\ m$$

$$b_0''' = 0{,}85\,\frac{\pi}{2}\,\frac{\gamma}{g}\,r\sigma^2\Delta L\sum\nolimits_{18} = -13{,}2\ m$$

$$a_1''' = 0{,}85\,\frac{\pi}{2}\,\frac{\gamma}{g}\,r\sigma^2\Delta L\sum\nolimits_{20} = 54{,}5\ m\cdot м$$

$$b_1''' = 0{,}85\,\frac{\pi}{2}\,\frac{\gamma}{g}\,r\sigma^2\Delta L\sum\nolimits_{21} = 277{,}3\ m\cdot м$$

Номера чебышевских сечений	Cy^2	Cxy^2	$Cy^2 \cos\varphi$	$Cy^2 \sin\varphi$	Cx^2y^2	$Cxy^2 \cos\varphi$	$Cxy^2 \sin\varphi$
	$м^2$	$м^3$	$м^2$	$м^2$	$м^4$	$м^3$	$м^3$
	(25)·(26)	(6)·(27)	(15)·(27)	(16)·(27)	(7)·(27)	(15)·(28)	(16)·(28)
1	27	28	29	30	31	32	33
1	0,83	18,3	—0,79	0,26	402	—17,5	5,7
2	13,13	190,0	—3,63	12,62	2748	—52,5	182,5
3	16,18	205,5	—0,89	16,15	2613	—11,3	—205,0
4	22,48	86,2	19,79	10,57	330	75,7	40,5
5	22,90	— 6,9	22,90	— 0,87	2	— 6,9	0,3
6	22,69	—100,3	19,15	—12,18	445	—84,8	54,0
7	17,11	—227,6	—2,26	—16,94	3029	30,0	225,0
8	14,84	—223,4	—5,14	—13,92	3354	77,4	209,5
9	0,36	— 8,3	—0,35	— 0,09	187	8,0	2,0
	130,53	—66,5	48,78	—4,40	13110	18,2	924,5
	$\sum_{15}$	$\sum_{16}$	$\sum_{17}$	$\sum_{18}$	$\sum_{19}$	$\sum_{20}$	$\sum_{21}$

$$\Delta M = 0{,}85 \frac{\pi}{2} \frac{\gamma}{g} \Delta L \sum\nolimits_{15} = 99{,}2 \ т \cdot м^{-1} \ сек.^2$$

$$\Delta M l_1 = 0{,}85 \frac{\pi}{2} \frac{\gamma}{g} \Delta L \sum\nolimits_{16} = -50{,}5 \ т \cdot сек.^2$$

$$\Delta J = 0{,}85 \frac{\pi}{2} \frac{\gamma}{g} \Delta L \sum\nolimits_{19} = 9960 \ т \cdot м \ сек.^2$$

Расчет основных величин, входящих в уравнения (196), приведен в табл. 18, причем определение момента инерции массы корабля выполнено по формуле (165), а закон распределения присоединенной массы воды — по формуле (168).

Периоды качки судна на тихой воде равны:

$$T_3 = 2\pi\sqrt{\frac{D+\Delta D}{g\gamma S}} = 2\pi\sqrt{\frac{936+99\cdot 9{,}81}{9{,}81\cdot 1{,}025\cdot 348}} = 4{,}63 \text{ сек.}$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J+\Delta J}{D(R_g-a)}} = 2\pi\sqrt{\frac{14\,390+9960}{936\,(50{,}8-1{,}5)}} = 4{,}55 \text{ сек.}$$

Скорость бега волны:

$$c = 1{,}25\sqrt{\lambda} = 1{,}25\times\sqrt{49{,}1} = 8{,}75 \text{ м/сек.}$$

Истинный период волны:

$$\tau_0 = 0{,}8\sqrt{\lambda} = 5{,}61 \text{ сек.}$$

Кажущийся период возмущающей силы от действия волн:

$$\tau = \frac{\tau_0}{1+\frac{v}{c}} = \frac{5{,}61}{1+\frac{0{,}514\cdot 7}{8{,}75}} = 3{,}98 \text{ сек.}$$

Сравнение периодов качки судна на тихой воде с величиной кажущегося периода показывает, что резонанса не будет.

Частота возмущающей силы:

$$\sigma = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{6{,}28}{3{,}98} = 1{,}58 \text{ сек.}^{-1}.$$

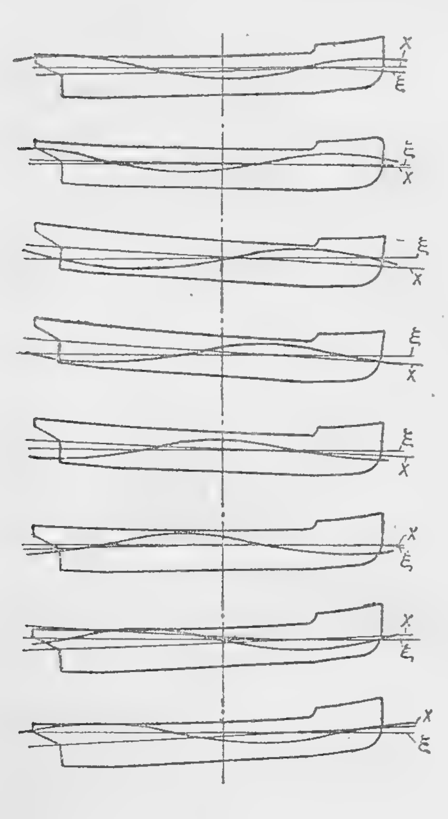


Рис. 56.

Коэффициент сопротивления вертикальной и килевой качке принят равным $K = 0{,}18\ т \cdot м^{-3} \cdot$ сек.

После подстановки численных значений из табл. 18 в уравнения (196) получается система четырех уравнений для определения неизвестных A, B, α, β:

$$-13{,}0A + 99{,}0B + 12\alpha - 31{,}6\beta = -85$$
$$-99{,}0A - 13{,}0B + 31{,}6\alpha + 12{,}0\beta = 33{,}7$$
$$+12{,}0A - 31{,}6B - 14\,740\alpha + 13\,190\beta = 1226$$
$$+31{,}6A + 12{,}0B - 13\,190\alpha - 14\,740\beta = -316$$

Таблица 19

Расчет положений корабля на волнении

№ положений	t	σt	$\cos \sigma t$	$\sin \sigma t$	$A \cdot IV$	$B \cdot V$	$\zeta = VI + VII$	$\alpha \cdot IV$	$\beta \cdot V$	$\psi = IX + X$	$\psi^\circ = 57{,}3 \cdot XI$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	0	0	1,000	0	0,278	0	0,278	—0,034	0	—0,034	—1,9
1	$^1/_8\tau$	$^\pi/_4$	0,707	0,707	0,197	—0,335	—0,138	—0,024	0,037	0,013	0,7
2	$^2/_8\tau$	$^\pi/_2$	0	1,000	0	—0,475	—0,475	0	0,052	0,052	3,0
3	$^3/_8\tau$	$^{3\pi}/_4$	—0,707	0,707	—0,197	—0,335	—0,532	0,024	0,037	0,061	3,5
4	$^4/_8\tau$	π	—1,000	0	—0,278	0	—0,278	0,034	0	0,034	1,9
5	$^5/_8\tau$	$^{5\pi}/_4$	—0,707	—0,707	—0,197	0,335	0,138	0,024	—0,037	—0,013	—0,7
6	$^6/_8\tau$	$^{3\pi}/_2$	0	—1,000	0	0,475	0,475	0	—0,052	—0,052	—3,0
7	$^7/_8\tau$	$^{7\pi}/_4$	0,707	—0,707	0,197	0,335	0,532	—0,024	—0,037	—0,061	—3,5

В результате решения этих уравнений методом последовательных приближений, получаются после третьего приближения следующие значения искомых коэффициентов: $A = 0{,}278$; $B = -0{,}475$; $\alpha = -0{,}034$; $\beta = 0{,}052$.

Подстановка этих величин в уравнения (196) дает для их левых частей значения, соответственно равные: $-85{,}2$; $33{,}8$; 1205; -316; близость значений левых и правых частей уравнений позволяет остановиться на результатах третьего приближения.

Вычисление положений корабля в пространстве для 8 моментов времени произведено в табл. 19.

Чертеж восьми положений судна на волне показан на рис. 56.

§ 16. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ КОРАБЛЯ ПО СХЕМЕ Г. Е. ПАВЛЕНКО

Ввиду того, что описанная в §§ 14 и 15 схема расчета продольной качки является довольно громоздкой при значительной условности

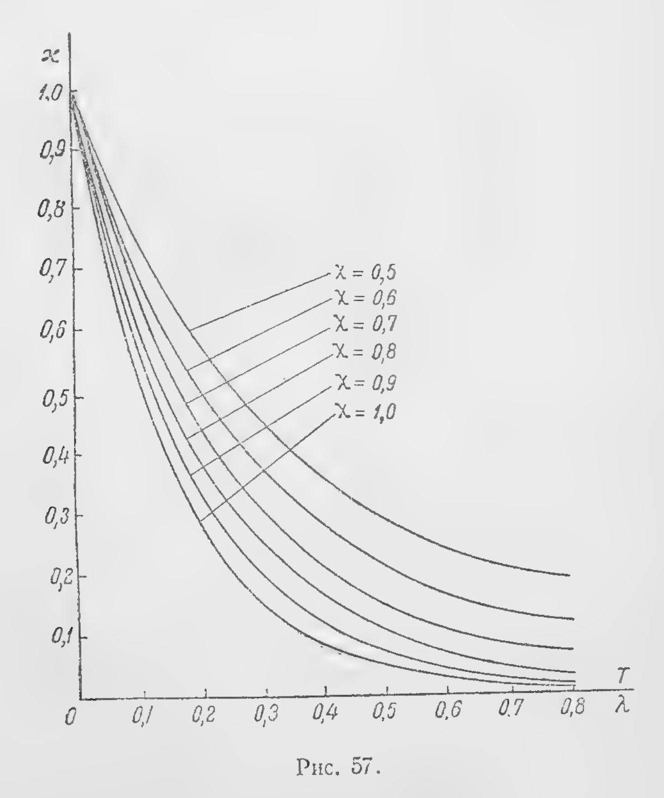


Рис. 57.

заложенных в ней допущений, проф. Г. Е. Павленко предложил внести в расчет ряд упрощающих видоизменений.

В первую очередь эти видоизменения относятся к вычислению правых частей уравнений (187) и (188), а следовательно и системы уравнений (196). Влияние гидродинамического распределения давления воды в волне может быть учтено введением редукционного коэффициента $\varkappa$, на который множится полувысота волны r. Величина $\varkappa$ зависит от отношения осадки корабля к длине волны и коэффициента вертикальной его полноты и может быть определена по графику (рис. 57).

Кроме того, Павленко предполагает, что распределение по длине корабля присоединенной массы воды происходит пропорционально ординатам грузовой ватерлинии. При этом допущении в постоянные правой части a — b входят одни и те же интегралы, что ведет к значительному сокращению расчета.

Постоянные a — b при сохранении обозначений § 14 принимают вид:

$$\left.\begin{aligned}
a'_0 &= 2\gamma\varkappa r \int\limits_L y \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b'_0 &= 2\gamma\varkappa r \int\limits_L y \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
a'_1 &= 2\gamma\varkappa r \int\limits_L xy \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b'_1 &= 2\gamma\varkappa r \int\limits_L xy \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx
\end{aligned}\right\} \qquad (198)$$

$$\left.\begin{aligned}
a''_0 &= 2k\varkappa r\sigma \int\limits_L y \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b''_0 &= 2k\varkappa r\sigma \int\limits_L y \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
a''_1 &= 2k\varkappa r\sigma \int\limits_L xy \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b''_1 &= 2k\varkappa r\sigma \int\limits_L xy \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx
\end{aligned}\right\} \qquad (199)$$

$$\left.\begin{aligned}
a'''_0 &= 2\varkappa r\sigma^2 \frac{\Delta D}{gS} \int\limits_L y \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b'''_0 &= 2\varkappa r\sigma^2 \frac{\Delta D}{gS} \int\limits_L y \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
a'''_1 &= 2\varkappa r\sigma^2 \frac{\Delta D}{gS} \int\limits_L xy \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\
b'''_1 &= 2\varkappa r\sigma^2 \frac{\Delta D}{gS} \int\limits_L xy \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx
\end{aligned}\right\} \qquad (200)$$

При расчете по формулам (198)—(200) табл. 18 значительно упростится, так как из нее выпадут столбцы 12, 13, 17—20, 25—33.

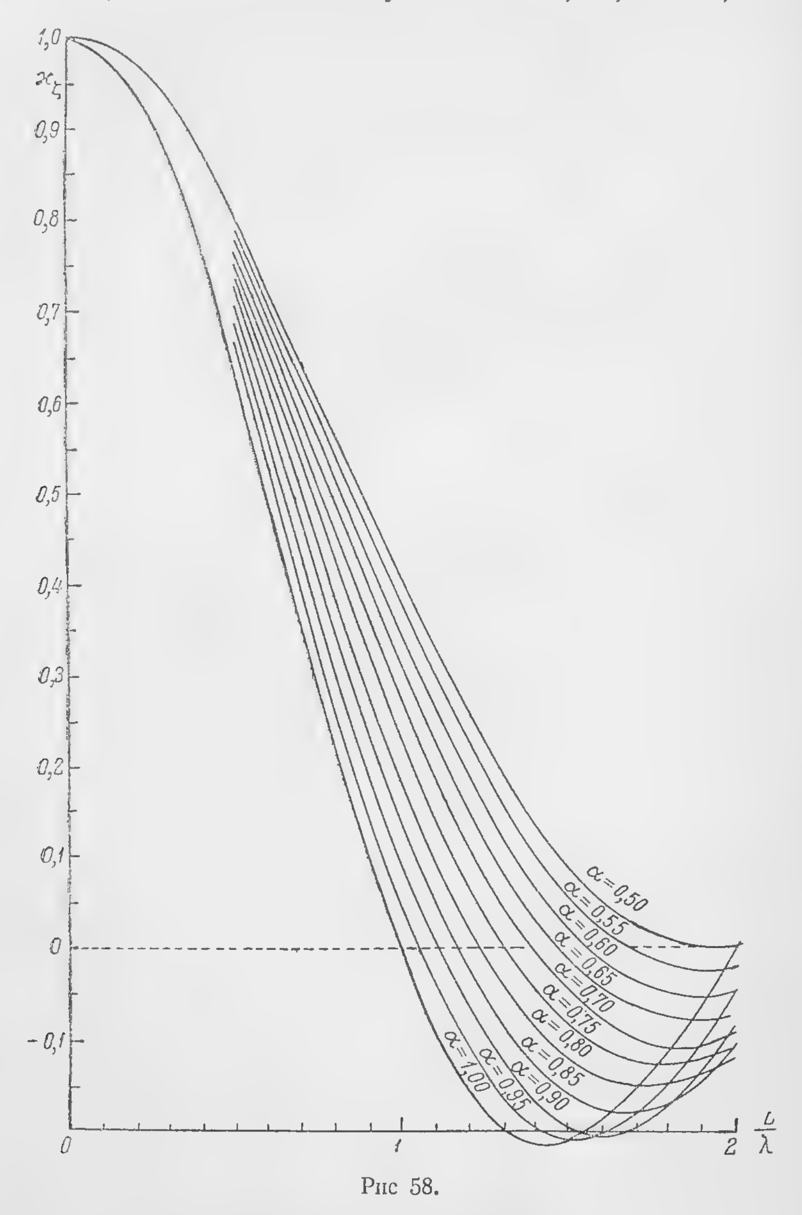


Рис 58.

Павленко отмечает далее, что большинство существующих судов имеет такую форму, при которой сечение, заключающее центр тяжести судна, и сечение, заключающее центр тяжести грузовой ватерлинии,

расположены весьма близко друг к другу так, что длина l составляет малую долю от длины корабля. В таких случаях можно без большого

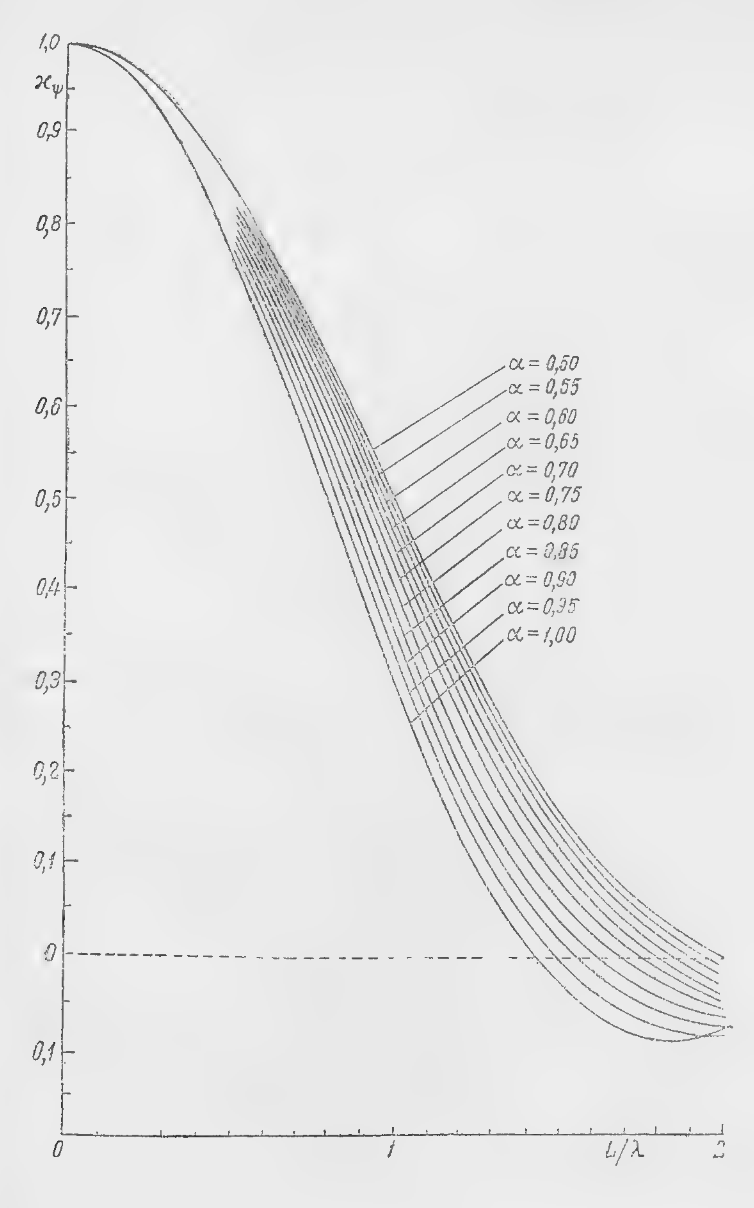


Рис. 59.

ущерба для правильности выводов при изучении продольной качки принять $l = 0$, что влечет за собой новые значительные упрощения расчета.

Действительно, в этом случае в уравнениях (187) и (188), а следовательно и в системе уравнений (196) пропадут все члены, содержащие множители l. Уравнения (196) распадутся на две системы, причем в пару первых двух уравнений не войдут неизвестные α и β, а в пару последних — A и B.

Кроме того, при вычислении интегралов, входящих в постоянные a — b, можно ограничиться расчетом интегралов вида:

$$\left.\begin{aligned} \int\limits_L y\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx &= \varkappa_\zeta S \\ \int\limits_L xy\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx &= \varkappa_\psi I_{gy}\frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned}\right\} \qquad (201)$$

Прочими интегралами можно пренебречь, как весьма малыми по сравнению с оставленными.

Приближенные значения коэффициентов $\varkappa_\zeta$ и $\varkappa_\psi$, вычисленные в предположении параболичности ватерлинии, могут быть получены по приводимым на рис. 58 и 59 графикам в функции от отношения $\frac{L}{\lambda}$ и коэффициента полноты площади ватерлинии.

Общий ход расчета при сделанных упрощениях сводится к следующему.

1. Вычисляются интегралы (201) либо по правилам приближенного интегрирования, либо по коэффициентам $\varkappa_\zeta$ и $\varkappa_\psi$ с помощью графиков (рис. 58 и 59).

2. Определяются постоянные a — b по формулам:

$$\left.\begin{aligned} &a_0' = 2\gamma\varkappa r\varkappa_\zeta S; && a_0'' = 2k\varkappa r\sigma\varkappa_\zeta S; && a_0''' = 2\varkappa r\sigma^2\frac{\Delta D}{gS}\varkappa_\zeta S \\ &b_0' = 0; && b_0'' = 0; && b_0''' = 0; \\ &a_1' = 0; && a_1'' = 0; && a_1''' = 0; \\ &b_1' = 2\gamma\varkappa r\varkappa_\psi\cdot I_{gy}\frac{2\pi}{\lambda}; && b_1'' = 2k\varkappa r\sigma\varkappa_\psi I_{gy}\frac{2\pi}{\lambda}; && b_1''' = 2\varkappa r\sigma^2\frac{\Delta D}{gS}\varkappa_\psi I_{gy}\frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned}\right\} \qquad (202)$$

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= a_0' - a_0''' \\ b_0 &= -a_0'' \\ a_1 &= b_1'' \\ b_1 &= b_1' - b_1''' \end{aligned}\right\} \qquad (203)$$

3. Составляется система уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \left(\gamma S - \frac{D+\Delta D}{g}\sigma^2\right)A + kS\sigma B = a_0 \\ kS\sigma A - \left(\gamma S - \frac{D+\Delta D}{g}\sigma^2\right)B = \pm b_0 \end{aligned}\right\} \quad (204)$$

$$\left.\begin{aligned} [D(R_g - a) - (J+\Delta J)\sigma^2]\,\alpha + kI_{gy}\sigma\beta = a_1 \\ kI_{gy}\sigma\alpha - [D(R_g - a) - (J+\Delta J)\sigma^2]\,\beta = \pm b_1 \end{aligned}\right\} \quad (205)$$

Здесь знак $(+)$ в правой части каждого из вторых уравнений становится при наличии встречной волны, а знак $(-)$ — при попутной.

4. В результате решения системы (204) и (205) определяются постоянные A, B, α, β и вычисляются координаты корабля в пространстве

$$\left.\begin{aligned} \zeta_g = A\cos\sigma t + B\sin\sigma t \\ \psi = \alpha\cos\sigma t + \beta\sin\sigma t \end{aligned}\right\} \quad (206)$$

5. По известным ζ_g и ψ и уравнению профиля волны (197) графически строятся положения корабля на волне для любого момента времени, аналогично изображенным на рис. 56.

§ 17. ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ КИЛЕВОЙ КАЧКИ

В тех случаях, когда обводы корабля сильно отличаются от прямостенных, исследование килевой качки может быть более точно выполнено методом численного интегрирования диференциальных уравнений. Диференциальные уравнения продольной качки принимаются в виде:

$$\frac{D+\Delta D}{g}\ddot{\zeta} + kS\dot{\zeta} = -\gamma V + D + (\mp b_0'' - a_0''')\cos\sigma t + (-a_0'' \pm b_0''')\sin\sigma t, \quad (207)$$

$$(J+\Delta J)\ddot{\psi} + kI_{gy}\dot{\psi} = \gamma\mathfrak{M} + (\mp b_1'' - a_1''')\cos\sigma t + (-a_1'' \pm b_1''')\sin\sigma t, \quad (208)$$

где верхние знаки перед членами правой части принимаются в случае встречной волны, а нижние при попутной.

Здесь V — погруженный в воду мгновенный объем судна, $\mathfrak{M}$ — момент этого объема относительно поперечной оси, проходящей через ЦТ судна, постоянные a, b определяются выражениями (191) и (192). Прочие обозначения имеют тот же смысл, как и в § 14. Уравнения (207) и (208) выведены в предположении, что ЦТ корабля, ЦТ площади его ватерлинии и ЦТ присоединенной массы воды расположены на одной вертикали, т. е., что $l = 0$ (см. § 16). По произведенному исследованию, вносимая этим предположением неточность не имеет

практического значения. Для производства численного интегрирования уравнения (207) и (208) переписываются в виде:

$$\frac{D_1}{g}\ddot{\zeta} + kS\dot{\zeta} + C = 0$$

$$J_1\ddot{\psi} + kI_{gy}\dot{\psi} + \varepsilon = 0,$$

где

$$D_1 = D + \Delta D,$$

$$J_1 = J + \Delta J,$$

$$-C = -\gamma V + D + (\mp b_0'' - a_0''')\cos\sigma t + (-a_0'' \pm b_0''')\sin\sigma t, \quad (209)$$

$$-\varepsilon = \gamma\mathfrak{M} + (\mp b_1'' - a_1''')\cos\sigma t + (-a_1'' \pm b_1''')\sin\sigma t. \quad (210)$$

Профиль волны задается формулой

$$\varkappa\zeta_{\text{в}} = \varkappa r\cos\frac{2\pi x}{\lambda}, \quad (211)$$

где r — полувысота волны;

λ — ее длина;

$\varkappa$ — коэффициент, учитывающий поправку на гидродинамическое давление, определяется по графику рис. 57.

Для определения V и $\mathfrak{M}$ производятся следующие операции.

1. Для известных ζ и ψ в трех сечениях масштаба Бонжана (например при $x=0$ и на носовом и кормовом перпендикулярах) отмечают положение оси волны, пользуясь при этом следующим правилом знаков: $\zeta > 0$, если ЦТ корабля погружается в воду и $\psi > 0$ — при диференте на нос.

2. На масштаб Бонжана накладывают вычерченный на кальке профиль волны так, чтобы ось ее прошла через найденные отметки, а профиль волны имел у центра тяжести корабля требуемую фазу. Например, при $t=0$, τ, 2τ и т. д. $\left(\tau\text{ — кажущийся период волны } \tau = \frac{2\pi}{\sigma}\right)$ в сечении, где находится ЦТ корабля, должна быть расположена подошва волны; в последующие моменты профиль волны сдвигается в направлении бега волн на $\xi = \frac{\Delta t}{\tau}\lambda$.

Для учета поправки на гидродинамическое давление ординаты волнового профиля умножаются на величину $\varkappa$ и в таком виде наносятся на кальку.

3. Против каждого из 21 поперечных сечений прочитывается ордината масштаба Бонжана и наносится во второй или третий столбец табл. 20, служащей для определения величин $-\gamma V + D$ и $\gamma\mathfrak{M}$.

Если волновой профиль пересекает соответствующий шпангоут выше палубы, то в предположении сохранения цилиндричности волны следует в этом сечении снять с масштаба Бонжана наибольшую ординату, отвечающую погружению шпангоута по верхнюю кромку палубы.

Схема вычислений приведена в табл. 20.

Таблица 20

Вычисления по масштабу Бонжана

Расстояние подошвы волны от ЦТ $\xi = \lambda \frac{t}{\tau}$.

Погружение ЦТ корабля $\zeta =$

Диферент корабля в радианах $\psi =$

Номера шпангоутов	Ординаты масштаба Бонжана		Сумма ординат II + III	Разность ординат II — III	Множители ε	Произведение V · VI
	нос	корма				
I	II	III	IV	V	VI	VII
0 и 20	$\frac{1}{2}\omega_0$	$\frac{1}{2}\omega_{20}$				
1 и 19	ω_1	ω_{19}				
:						
:						
:						
9 и 11	ω_9	ω_{11}				
10	ω_{10}	—				
	Суммы $\gamma V - \gamma \frac{L}{20} \sum_1 =$ $X_c = \frac{L}{20} \frac{\sum_2}{\sum_1} =$		$\sum_1$	$-\gamma V + D =$ $= -\gamma \frac{L}{20} \sum_1 + D$ $\gamma\mathfrak{M} - \gamma V (X_g - X_c)$		$\sum_2$

где X_g — абсцисса ЦТ корабля.

В качестве начальных данных численного интегрирования могут быть приняты решения, относящиеся к прямостенному кораблю. Для этого достаточно решить две системы уравнений (204) и (205). Тогда согласно равенству (206) начальные значения ζ и ψ определяются следующими равенствами:

$$\zeta_0 = A,$$

$$\psi_0 = \alpha.$$

На основании того же равенства (206) могут быть найдены численные значения $\Delta\zeta_0$ и $\Delta\psi_0$, соответствующие промежутку интегрирования Δt:

$$\Delta\zeta_0 = \zeta_0 - \zeta_{-1} = A - A\cos\sigma\Delta t + B\sin\sigma\Delta t, \tag{212}$$

$$\Delta\psi_0 = \psi_0 - \psi_{-1} = \alpha - \alpha\cos\sigma\Delta t + \beta\sin\sigma\Delta t. \tag{213}$$

Для последующих расчетов пользуются формулами Эйлера:

$$\Delta\zeta_n = p\Delta\zeta_{n-1} - qC_{n-1}, \tag{214}$$

$$\Delta\psi_n = p_1\Delta\psi_{n-1} - q_1\varepsilon_{n-1}, \tag{215}$$

где

$$p = \frac{1 - \dfrac{kS\,\Delta t}{2\dfrac{D_1}{g}}}{1 + \dfrac{kS\,\Delta t}{2\dfrac{D_1}{g}}}, \tag{216}$$

$$q = \frac{1}{1 + \dfrac{kS\,\Delta t}{2\dfrac{D_1}{g}}} \frac{\Delta t^2}{\dfrac{D_1}{g}}, \tag{217}$$

$$p_1 = \frac{1 - \dfrac{kI_{gy}\,\Delta t}{2J_1}}{1 + \dfrac{kI_{gy}\,\Delta t}{2J_1}}, \tag{218}$$

$$q_1 = \frac{1}{1 + \dfrac{kI_{gy}\,\Delta t}{2J_1}} \frac{\Delta t^2}{J_1}. \tag{219}$$

Вычисления располагаются по схеме, указанной в табл. 21 и 22. Значения функций:

$$(\mp b_0' - a_0''') \cos \sigma t + (-a_0'' \pm b_0''') \sin \sigma t = \alpha_0 \cos \sigma t + \beta_0 \sin \sigma t,$$

$$(\mp b_1'' - a_1''') \cos \sigma t + (-a_1'' \pm b_1''') \sin \sigma t = \alpha_1 \cos \sigma t + \beta_1 \sin \sigma t$$

вычисляются заблаговременно и заносятся в соответствующие столбцы (IV) указанных таблиц.

Таблица 21

Численное интегрирование уравнения вертикальной качки

Момент времени	ζ	$-\gamma V + D$	$\alpha_0 \cos \sigma t + \beta_0 \sin \sigma t$	$-C = $ III+IV	$-qC_{n-1} = q \cdot$ V	$p\,\Delta\zeta_{n-1}$	$\Delta\zeta =$ VI+VII
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
0 Δt $2\Delta t$							

Вычисления продолжаются до тех пор, пока результаты интегрирования не начинают периодически повторяться. Для удобства определения того момента времени, начиная с которого решение становится периодическим, результаты вычислений, относящиеся к различным истекшим периодам волны, удобно наносить на общий чертеж, а соответствующие кривые помечать для отличия последовательной

римской нумерацией. Произведенные расчеты показали, что принятие в качестве промежуточного интегрирования величины $\Delta t = \frac{\tau}{20}$ обеспечивает необходимую точность.

Таблица 22

Численное интегрирование уравнения килевой качки

Момент времени	ψ	$\gamma\mathfrak{M}$	$\alpha_1 \cos \sigma t + \beta_1 \sin \sigma t$	$-\varepsilon = $ =III+IV	$-q_1\varepsilon =$ V q_1	$p_1 \Delta\psi_{n-1}$	$\Delta\psi =$ =VI+VII
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
0 Δt $2\Delta t$							

Среднее время, потребное на расчет одной точки опытным вычислителем, составляет около 40—45 мин.

Результаты интегрирования позволяют построить кривые заливаемости. Для построения их достаточно по найденным значениям координат ζ и ψ построить положения корабля на волне в различные моменты времени, например при

$$t = 0, \quad \frac{1}{10}\tau, \quad \frac{2}{10}\tau \text{ и т. д.}$$

Далее, на указанных графиках определяются для ряда поперечных сечений величины наибольших изменений уровня воды по отношению к плоскости КВЛ, которые затем откладываются при соответствующих шпангоутах на боку корабля. Проведенные через найденные точки плавные кривые называются кривыми заливаемости и ограничивают зону колебаний уровня воды относительно корабля при его продольной качке.

Кривые заливаемости могут быть также построены по данным расчета качки в первом приближении. Ординаты кривых заливаемости, откладываемые на чертеже бокового вида корабля вверх и вниз от грузовой ватерлинии, определяются зависимостью

$$Z = \sqrt{\left(A + x\alpha - r_m \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\right)^2 + \left(B + x\beta + r_m \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\right)^2}, \quad (220)$$

где A, B, α, β определяются в результате решения системы уравнений (196) или (204) и (205).

ГЛАВА III

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧКИ СУДОВ И ИХ МОДЕЛЕЙ

§ 18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА БОКОВОЙ КАЧКИ СУДНА НА ТИХОЙ ВОДЕ

Величина периода боковой качки судна на тихой воде характеризует мореходные качества судна и степень подверженности его боковой качке. Поэтому для вновь построенных судов целесообразно определять период боковой качки опытным путем. Для этой цели судно раскачивается перебежками команды с одного борта на другой, пока амплитуда качки не достигнет 4—5°. После этого команда устанавливается в районе диаметральной плоскости корабля и дальше либо производится запись затухающей качки с помощью регистрирующего прибора, либо ограничиваются замером периода качки T с помощью секундомеров. В последнем случае замеряют секундомерами продолжительность t_n для n полных колебаний и определяют затем период по формуле $T = \frac{t_n}{n}$. Опыт этот целесообразно производить непосредственно после опытного определения метацентрической высоты, так как при этом бывает точно известно состояние нагрузки корабля.

Наличие точных сведений о нагрузке позволяет произвести по данным опыта перерасчет периода качки для любого состояния нагрузки, воспользовавшись ведомостью излишних и недостающих грузов. Пусть в условиях опыта известны период качки T_0, водоизмещение D_0 и метацентрическая высота $(r - a)_0$; тогда момент инерции массы корабля в условиях опыта будет

$$A_0 + \Delta A = D_0 (r - a)_0 \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2, \qquad (221)$$

где ΔA — момент инерции присоединенной массы воды.

Если осадка корабля для расчетного случая нагрузки не слишком сильно отличается от той, которая была во время опыта, значение ΔA может быть принято в обоих случаях приблизительно одинаковым.

Величина момента инерции массы в расчетном случае может быть определена по формуле

$$A_1 + \Delta A = A_0 + \Delta A - \sum \left\{\frac{P_i}{g} [Y_i^2 + (Z_i - Z_{g_0})^2] + i_i\right\} + \\ + \sum \left\{\frac{P_j}{g} [Y_j^2 + (Z_j - Z_{g_0})^2] + i_j\right\} - \frac{D_1}{g} (Z_{g_1} - Z_{g_0})^2, \qquad (222)$$

где P_i, Y_i, Z_i, i_i — веса, координаты центров тяжести и собственные моменты инерции излишних грузов, а P_j, Y_j, Z_j, i_j — те же величины для недостающих грузов; D_1 — водоизмещение корабля; Z_{g_1} — возвышение центра тяжести над основной линией в расчетном случае нагрузки; Z_{g_0} — возвышение центра тяжести в условиях опыта.

Расчетные схемы для вычисления момента инерции по формуле (222) аналогичны приведенным в § 2.

Период качки судна для расчетного случая нагрузки определится по формуле:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{A_1 + \Delta A}{D\,(r - a)}}. \qquad (15)$$

Раскачивание корабля следует производить таким образом, чтобы команда находилась в крайнем положении на опускающемся вниз борту в тот момент, когда корабль переходит через прямое положение, меняя при этом направление перебежки.

Если помимо периода качки желают определить закон затухания амплитуд, опыт следует производить на достаточном расстоянии от берегов, в противном случае распространяющиеся от корабля волны будут отражаться от берегов и вызывать дополнительные качания корабля, нарушая тем самым закон затухания.

§ 19. ЗАПИСЬ ДВИЖЕНИЯ КОРАБЛЯ

Техника измерения движения судна при качке до сего времени недостаточно разработана и применяемая для этой цели аппаратура не приобрела стандартного характера. Поэтому здесь приводится описание лишь общей схемы отдельных приборов без детального разбора их устройства.

Простейшим устройством для визуального определения амплитуд боковой или килевой качки является рейка, снабженная вертикальными делениями. Она устанавливается на пути луча зрения наблюдателя, располагающегося в определенной точке судна и визирующего горизонт, как показано на рис. 60. По этому же принципу построен переносный аппарат, изображенный на рис. 61.

Рис. 60.

Более совершенным способом измерения качки путем визирования горизонта является фотографический способ. Прибор представляет фотографический аппарат, устанавливаемый в плоскости измеряемых колебаний судна так, чтобы светочувствительная пленка фиксировала изображение горизонта. Перед пленкой устанавливается узкая вертикальная щель, вследствие чего изображение представляет вертикальную полоску, разделяющуюся горизонтом на две части различной освещенности. Светочувствительной пленке придается равномерное

движение, перпендикулярное щели, в результате которого на пленке получается кривая, записанная перемещающимся по пленке, вследствие

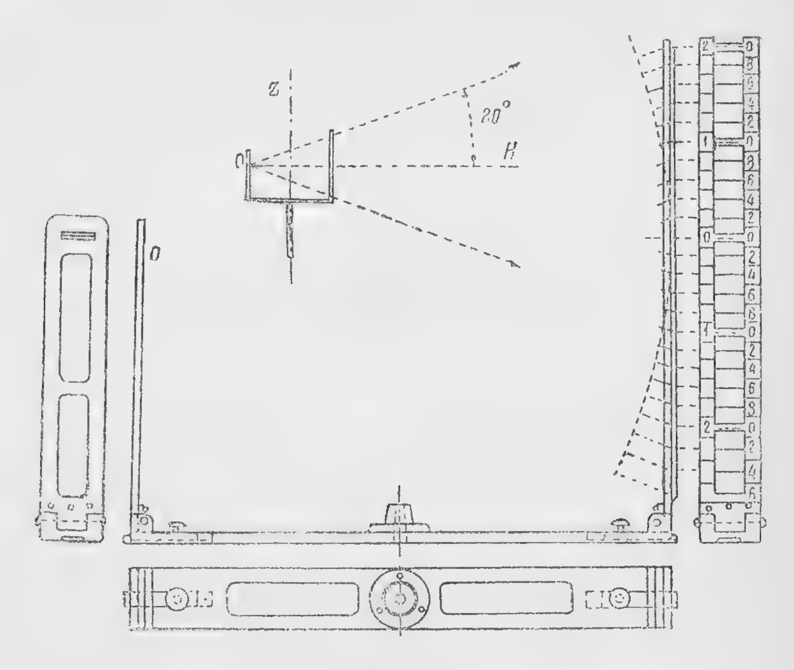
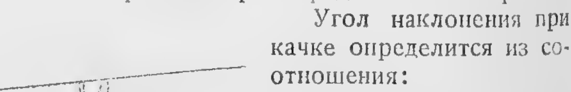
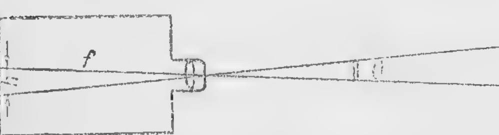
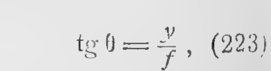


Рис. 61.

качки судна, изображением горизонта (рис. 62). На этой же пленке ведется фотографическая запись времени через определенные интервалы


Угол наклонения при качке определится из соотношения:





$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{f}, \quad (223)$$

где y — перемещение точки раздела, а f — фокусное расстояние объектива.

При хорошей видимости горизонта прибор дает отчетливую и точную запись.

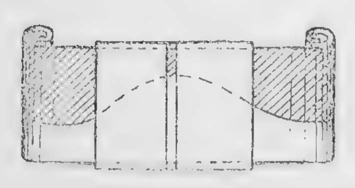
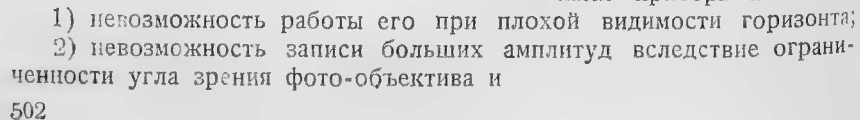


Рис. 62.

Основными недостатками прибора являются:


1) невозможность работы его при плохой видимости горизонта;

2) невозможность записи больших амплитуд вследствие ограниченности угла зрения фото-объектива и

3) необходимость производства дополнительных работ, связанных с проявлением записи.

Обычные кренометры, имеющиеся на корабле и служащие для определения статических кренов, совершенно не пригодны для измерения амплитуд качки. Даваемая ими погрешность может достигать 30% и более — в зависимости от местоположения кренометра на судне и характера качки. Обычно такие кренометры дают преувеличенные показания наибольших кренов при качке, что следует иметь в виду при оценке сведений, сообщаемых моряками на основании их наблюдений по кренометру.

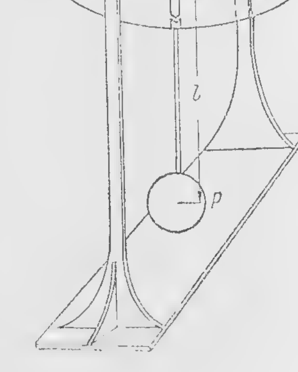


Рис. 63.

Для того чтобы кренометры маятникового типа давали достаточную точность, период собственных колебаний их должен быть весьма велик по сравнению с периодом качки корабля, а сопротивление колебаниям должно быть очень мало. Условия эти соблюдались в кренометре Бертена, представляющем собой длиннопериодный маятник с большим моментом инерции и малым восстанавливающим моментом. Прибор этот был весьма громоздок и представляет лишь исторический интерес.

Более легким и компактным прибором является гироскопический маятник, состоящий из быстровращающегося гироскопа, подвешенного на кардановом подвесе, так что центр тяжести маховика совпадает с точкой пересечения осей маховика гироскопа и цапф его колец.

К внутреннему кольцу гироскопа подвешен груз P, так что центр тяжести его лежит на продолжении оси маховика гироскопа на расстоянии l от точки O пересечения осей (рис. 63).

При невращающемся маховике гироскопа прибор представляет сферический маятник, положение равновесия которого отвечает вертикальному положению оси маховика. При вращающемся маховике прибор представляет гироскопический маятник, период собственных колебаний которого равен

$$\tau = 2\pi \frac{An}{Pl}, \tag{224}$$

где A — момент инерции маховика относительно оси его вращения;

n — угловая скорость его вращения.

При большом значении n период τ может быть сделан достаточно большим по сравнению с величиной периода качки корабля и легко может быть получен равным нескольким минутам.

При качке корабля гироскопический маятник ведет себя аналогично простому длиннопериодному маятнику, т. е. ось его будет весьма мало отклоняться от вертикального направления. Это свойство гироскопического маятника используется для измерения и записи качки корабля.

Общий вид подобного прибора, применявшегося акад. Крыловым при записи качки судна „Метеор", показан на рис. 64.

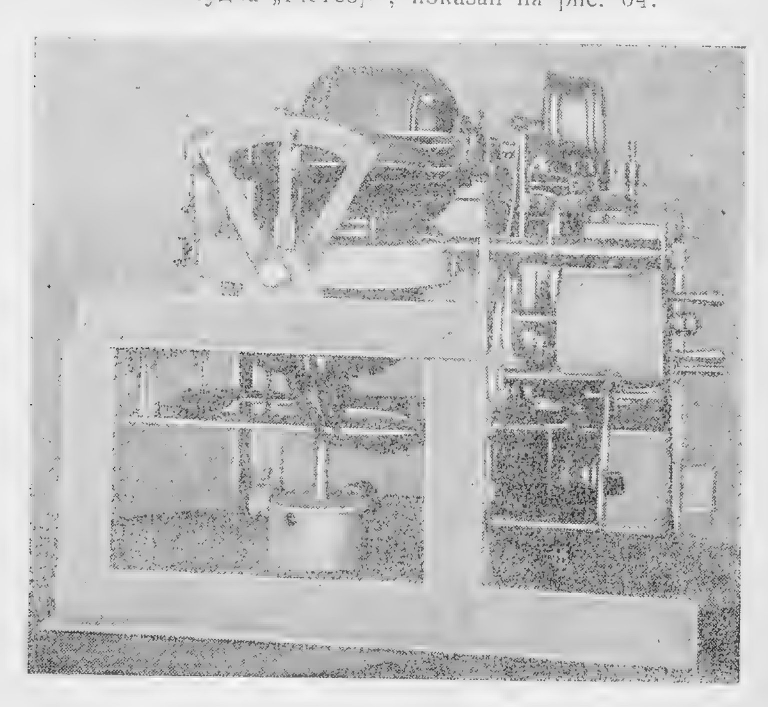


Рис. 64.

Значительно более сложную задачу представляет измерение и запись вертикальных колебаний корабля. Непосредственная фиксация амплитуды здесь оказывается невозможной вследствие значительной величины размахов, поэтому приходится ограничиться измерением ускорений, соответствующих вертикальным колебаниям.

Однако определение ускорений также является не простой задачей, так как одновременно с вертикальными колебаниями возникает обычно килевая и бортовая качка и отвечающие ей ускорения запутывают показания прибора, накладываясь на ускорения вертикальных колебаний.

Примером приборов подобного типа является прибор Мюллера, примененный для записи вертикальных колебаний во время экспедиции на судне „Сан-Франциско" и, по заявлениям участников экспедиции, хорошо себя зарекомендовавший.

Схема прибора показана на рис. 65. Груз P подвешен посредством двух тяг ab и cd к пружине S и может совершать собственные колебания с частотой, несколько меньшей 1 *гц*. Шарнирные тяги ab и cd служат направляющими и придают траектории колеблющегося груза прямолинейный характер. Жесткость пружин и масса груза подобраны таким образом, что отклонения груза от положения его равновесия в каждый момент пропорциональны вертикальным ускорениям.

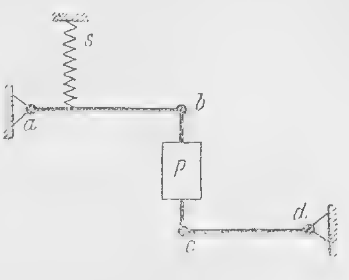


Рис. 65.

К грузу P присоединяется пишущее перо, которое записывает на равномерно движущейся ленте отклонения груза, а следовательно и ускорения корабля. Двукратным интегрированием этой записи получается кривая вертикальных колебаний корабля. Прибор снабжен демпфером, действие которого основано на использовании токов Фуко. Вследствие того, что траектория груза почти прямолинейна, прибор слабо реагирует на вращательные ускорения. Для уменьшения чувствительности прибора к боковой качке рекомендуется помещать его выше оси колебания на расстоянии $r = \frac{g}{2\omega}$, где g — ускорение силы тяжести, а ω — частота боковой качки.

§ 20. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧКЕ КОРАБЛЯ

Определение сопротивления качке корабля проще всего может быть произведено по кривой записи его затухающих колебаний. Для этой цели корабль раскачивают перебежками команды, как было указано в § 18, после чего записывают его затухающие колебания. Опыты следует производить в тихую погоду и вдали от берегов, чтобы исключить влияние волн. Необходимо также, чтобы глубина бассейна была достаточно велика, так как мелководье может повлиять на величину сопротивления качке. Желательно, чтобы опыты производились при таком состоянии нагрузки, для которого известна метацентрическая высота, так как знание ее может значительно расширить выводы, получаемые из эксперимента. Если корабль во время опытов имеет ход, должна быть фиксирована скорость хода, так как величина ее весьма сильно влияет на сопротивление качке. Обработка результатов опыта имеет целью определение вида зависимости

Рис. 66.

между моментом сил сопротивления качке и ее угловой скоростью Проф. Павленко предложена следующая схема обработки.

Пусть в результате опыта получена изображенная на рис. 66 кривая убывания амплитуд, где $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \ldots, \theta_n, \theta_{n+1}$ — ряд последовательных амплитуд, T — период качки. Угловая скорость качки в момент перехода судна через среднее положение приблизительно равна:

$$\dot{\theta}_n \cong \frac{\pi}{T}(\theta_n + \theta_{n+1}). \qquad (225)$$

Момент сил сопротивления, соответствующий найденному значению скорости $\dot{\theta}_n$, равен:

$$M(\dot{\theta}) = \frac{4\pi}{T^2}(\theta_n - \theta_{n+1})A_1. \qquad (226)$$

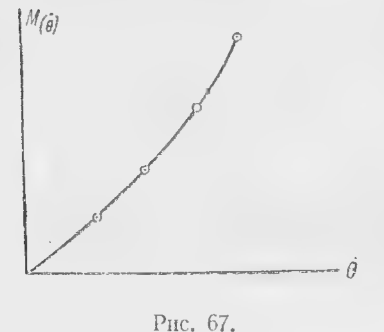


Рис. 67.

Откладывая по оси абсцисс значения угловой скорости, а по оси ординат соответствующие величины $M(\dot{\theta})$, можно построить кривую зависимости момента сил сопротивления от $\dot{\theta}$ угловой скорости качки (рис. 67).

Последующей обработкой этой кривой по методу наименьших квадратов можно получить приближенную аналитическую зависимость сопротивления от скорости качки.

§ 21. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧКИ СУДОВ НА МОДЕЛЯХ

Исследование качки судов путем опытов с их моделями возможно при условии соблюдения закона динамического подобия. Очевидно

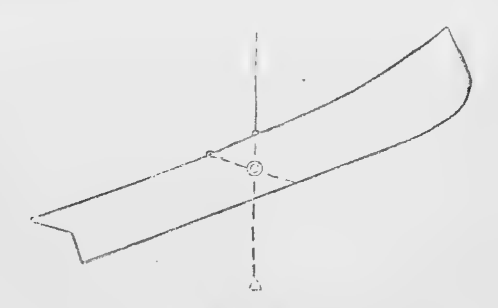


Рис. 68.

также, что между судном и моделью должно существовать геометрическое подобие, причем считается, что судно в λ раз длиннее модели.

Между факторами, определяющими движение судна и модели, должны существовать следующие отношения, вытекающие из законов подобия:

1.	Отношения линейных размеров судна, а также всех величин, имеющих линейную размерность (метацентрические высоты, координаты центров тяжести, радиусы инерции и т. д.), к соответствующим величинам для модели . .	λ
2.	Отношения площадей судна к площадям модели	λ^2
3.	Отношения объемов, весов, масс и сил . . .	λ^3
4.	Отношения моментов инерции масс	λ^5
5.	Отношения углов наклонений	1
6.	Отношения линейных ускорений	1
7.	Отношения плотностей, удельных весов . . .	1
8.	Отношения промежутков времени	$\sqrt{\lambda}$
9.	Отношения линейных скоростей	$\sqrt{\lambda}$
10.	Отношения угловых скоростей	$1 : \sqrt{\lambda}$
11.	Отношения угловых ускорений	$1 : \lambda$
12.	Отношения моментов объемов и сил	λ^4
13.	Отношения работы, количества энергии . . .	λ^4
14.	Отношения мощностей	$\lambda^{3\frac{1}{2}}$

Изготовление геометрически подобной модели для опытов с качкой может быть выполнено теми же способами, как и для исследования буксировочного сопротивления воды в испытательных бассейнах. Однако для опытов с качкой необходимо, помимо геометрического подобия, соблюсти также подобие в отношении веса модели, положения по длине и высоте ее центра тяжести и, наконец, в отношении величины моментов инерции массы модели. Поэтому опытам с качкой должна предшествовать тщательная тарировка модели в отношении указанных элементов.

Определение положения центра тяжести модели по длине и высоте может быть произведено одним из следующих способов: а) по пересечению отвесов; б) путем взвешивания на опорах; в) наклонением модели в воде; г) качанием в воздухе. Определения положения ЦТ по ширине модели производить почти не приходится вследствие симметрии громадного большинства судов относительно диаметральной плоскости.

При первом способе модель подвешивается за одну из своих точек, расположенную в диаметральной плоскости, и рядом с нею опускается отвес. Каким-либо способом (проще всего путем отбрасывания тени) на поверхности модели замечается линия пересечения ее плоскостью, в которой лежит линия отвеса и точка подвешивания модели (рис. 68). Повторяя дважды опыт при разных точках подвеса, получим на поверхности модели две линии, пересечение которых даст положение центра тяжести.

Способ этот представляет ряд неудобств при недостаточно прочной модели, плохом закреплении грузов внутри нее и др.

Взвешивание на опорах представляется более практичным способом, особенно для определения ЦТ модели по длине. Для определения положения его этим способом по высоте необходимо весьма надежно закреплять грузы внутри модели так, чтобы было возможно класть ее на борт на 90°.

Схема расположения приспособлений для взвешивания на опорах показана на рис. 69. Если x_1 и x_2 — расстояния опор от произвольно выбранной плоскости, D — вес модели и измеренный вес на опоре B за вычетом веса подкладок и клина равен P, то центр тяжести модели будет отстоять от выбранной плоскости на расстоянии

$$x_0 = x_1 + \frac{P}{D}(x_2 - x_1). \qquad (227)$$

Определение положения по высоте ЦТ модели путем наклонения ее на плаву аналогично опыту кренования для действительных судов.

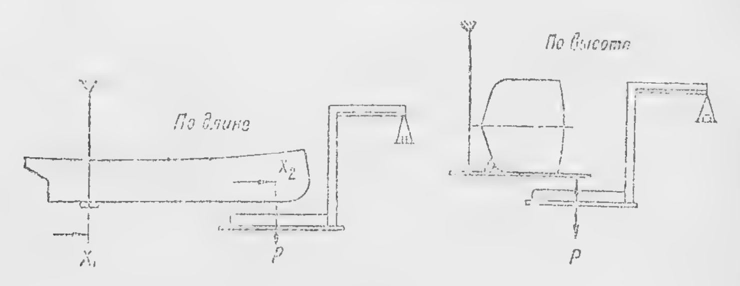


Рис. 69.

Перемещением груза на палубе поперек модели создается кренящий момент $M = Pl$, где P — вес груза, а l — плечо его переноса, и измеряется получающийся при этом крен θ модели. Поперечная метацентрическая высота модели определится формулой:

$$r - a = \frac{M}{D \operatorname{tg} \theta}. \qquad (228)$$

Положение центра тяжести модели будет известно, если по теоретическому чертежу подсчитаны метацентрический радиус модели и возвышение ее центра величины над основной

$$Z_g = Z_c + r - (r - a). \qquad (229)$$

Если имеется масштаб Бонжана, может быть подсчитано положение ЦТ модели по длине. Для этого нужно замерить осадки модели носом и кормой и, нанеся затем на масштаб Бонжана ватерлинию, определить по схемам, приведенным в § 10 раздела „Статика корабля", абсциссу x_c центра величины модели. Абсцисса центра тяжести ее будет приблизительно $x_g \approx x_c$.

Определение положения ЦТ модели путем раскачивания ее в воздухе может быть применено одновременно и для определения момента

инерции ее массы. Для этого модель подвешивается подобно тому, как схематически показано на рис. 70, и приводится в колебательное движение. По секундомеру отмечается продолжительность возможно большего количества целых колебаний и определяется период одного колебания τ_1. Частота колебания будет при этом $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_1}$.

Момент инерции массы модели относительно оси, проходящей через ее центр тяжести, равен:

$$A = Dl\left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{l}{g}\right), \quad (230)$$

где l — расстояние ЦТ модели от оси качаний.

Если расстояние l неизвестно, опыт повторяют дважды, меняя длину l на величину Δl. Пусть частота колебаний модели будет при этом ω_2. Тогда для расстояния l будет иметь место зависимость

$$l = \frac{\frac{\Delta l}{\omega_2^2} - \frac{(\Delta l)^2}{g}}{\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} + \frac{2\Delta l}{g}}. \quad (231)$$

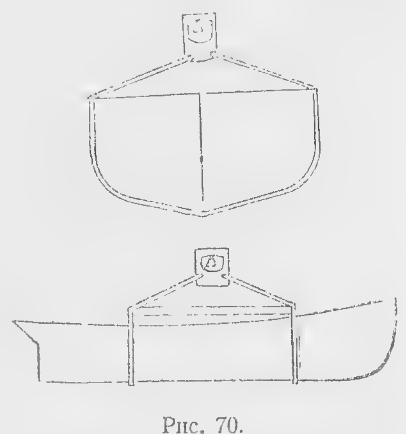


Рис. 70.

Для увеличения точности опыта по этому способу рекомендуется брать по возможности меньшую длину подвеса l, особенно при определении поперечного момента инерции. Конструктивно подвес модели целесообразно осуществлять, подводя опорные призмы под специально усиленные бимсы модели для того, чтобы длина подвеса могла быть фиксирована возможно точнее (рис. 71).

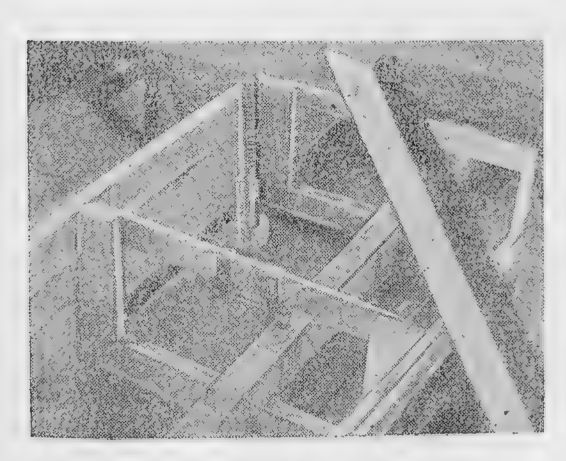


Рис. 71.

Взамен определения момента инерции массы модели относительно поперечно-горизонтальной оси, может быть определен момент инерции ее относительно поперечно-вертикальной оси. Обычно величины этих моментов инерции отличаются друг от друга не более чем на 1%, что позволяет в большинстве случаев произвести указанную замену.

Момент инерции относительно вертикальной оси может быть весьма просто определен по способу бифилярного подвеса. Для этого модель подвешивается на двух тросах одинаковой длины, закрепленных в диаметральной плоскости модели так, чтобы ЦТ ее был посередине между тросами. Затем модели сообщается колебательное движение в горизонтальной плоскости, вокруг вертикальной оси, и замеряется по секундомеру период τ полного колебания.

Момент инерции массы модели определяется по формуле:

$$J = \frac{Da^2\tau^2}{4\pi^2 l}, \tag{232}$$

где l — длина тросов, считая от точки подвеса до горизонтальной плоскости, проходящей через ЦТ модели, $2a$ — расстояние между тросами; D — вес модели.

Если положение ЦТ модели по высоте неизвестно и величина l не может быть определена, опыт следует повторить дважды, меняя длину тросов на замеренную величину Δl и измеряя период τ_1 полного колебания.

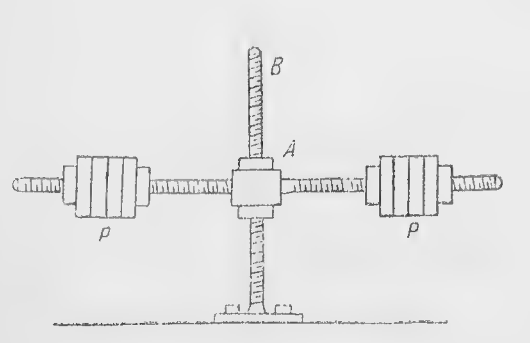


Рис. 72.

Момент инерции массы модели будет в этом случае равен:

$$J = \frac{Da^2}{4\pi^2} \frac{\tau_1^2 - \tau^2}{\Delta l}. \tag{233}$$

Тарировка модели значительно упрощается, если имеется возможность устанавливать раздельно заданное положение центра тяжести по высоте и заданный момент инерции. На рис. 72 показано такое приспособление, состоящее из горизонтальной поперечины с грузами, могущей передвигаться по вертикальному стержню.

Положение ЦТ судна по высоте определяется при любом положении поперечины, после чего, зная вес поперечины с грузами, легко установить вертикальное перемещение ее, необходимое для получения заданного положения центра тяжести. Далее, при любом случайном положении грузов определяется величина поперечного момента инерции массы и вычисляется горизонтальное перемещение грузов, которое дает требуемое значение момента инерции A.

Аппаратура для записи движения модели во время качки недостаточно разработана и применяемые устройства не получили стандартного характера. Как и для фиксации качки действительных судов, здесь могут быть применены способы фотографической записи качки, гироскопические приборы и др. Кроме того, для этой цели могут быть применены приборы, работающие по принципу шарнирных

параллелограммов, связывающих модель с берегом. Однако приборы последнего типа при наличии ряда достоинств обладают тем недостатком, что изменяют момент инерции массы модели и, что еще существеннее, влияют на величину сопротивления качке, вследствие трения в шарнирах, и потому нуждаются в особо тщательной тарировке.

Предпочтительнее применять приборы, минимальным образом стесняющие движение модели; наиболее простыми из них будут, повидимому, работающие по фотографическому принципу. Недостаток фотографических приборов состоит в необходимости дополнительной работы по проявлению и в невозможности сразу воспользоваться результатами проведенного опыта для корректировки последующего.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Применение вспомогательных вычислительных таблиц может облегчить вычисление разного рода приближенных квадратур, употребительных в расчетах по статике корабля. В частности, они могут быть особенно полезны при выполнении расчета элементов теоретического чертежа, расчетов плеч или моментов остойчивости формы и др. Таблицы составлены для ординат, изменяющихся через один сантиметр в диапазоне от нуля до 10 *м*. Первые три столбца таблиц содержат ординаты кривых (обычно ватерлиний) и квадраты и кубы их, необходимые при вычислении статических моментов и моментов инерции площадей ватерлиний относительно осей, параллельных оси абсцисс. Прочие столбцы таблиц содержат произведения ординат на целые числа от 1 до 10 и на квадраты их, необходимые при вычислении статических моментов и моментов инерции площадей кривых (обычно ватерлиний) относительно осей, параллельных оси ординат. Эти столбцы таблиц составлены применительно к правилам приближенного интегрирования с равноотстоящими ординатами при количестве их не более 21. Точность составления таблиц соответствует точности обычно применяемых в статике корабля расчетов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ

33 Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
0,01	0,00	0,00	0,02	0,0	0,03	0,1	0,04	0,2	0,05	0,2	0,06	0,4	0,07	0,5	0,08	0,6	0,09	0,8
0,02	0,00	0,00	0,04	0,1	0,06	0,2	0,08	0,3	0,10	0,5	0,12	0,7	0,14	1,0	0,16	1,3	0,18	1,6
0,03	0,00	0,00	0,06	0,1	0,09	0,3	0,12	0,5	0,15	0,8	0,18	1,1	0,21	1,5	0,24	1,9	0,27	2,4
0,04	0,00	0,00	0,08	0,2	0,12	0,4	0,16	0,6	0,20	1,0	0,24	1,4	0,28	2,0	0,32	2,6	0,36	3,2
0,05	0,00	0,00	0,10	0,2	0,15	0 4	0,20	0,8	0,25	1,2	0,30	1,8	0,35	2,4	0,40	3,2	0,45	4,0
0,06	0,00	0,00	0,12	0,2	0,18	0,5	0,24	1,0	0,30	1,5	0,36	2,2	0,42	2,9	0,48	3,8	0,54	4,9
0,07	0,00	0,00	0,14	0,3	0,21	0,6	0,28	1,1	0,35	1,8	0,42	2,5	0,49	3,4	0,56	4,5	0,63	5,7
0,08	0,01	0,00	0,16	0,3	0,24	0,7	0,32	1,3	0,40	2,0	0,48	2,9	0,56	3,9	0,64	5,1	0,72	6,5
0,09	0,01	0,00	0,18	0,4	0,27	0,8	0,36	1,4	0,45	2,2	0,54	3,2	0,63	4,4	0,72	5,8	0,81	7,3
0,10	0,01	0,00	0,20	0,4	0,30	0,9	0,40	1,6	0,50	2,5	0,60	3,6	0,70	4,9	0,80	6,4	0,90	8,1
0,11	0,01	0,00	0,22	0,4	0,33	1,0	0,44	1,8	0,55	2,8	0,66	4,0	0,77	5,4	0,88	7,0	0,99	8,9
0,12	0,01	0,00	0,24	0,5	0,36	1,1	0,48	1,9	0,60	3,0	0,72	4,3	0,84	5,9	0,96	7,7	1,08	9,7
0,13	0,02	0,00	0,26	0,5	0,39	1,2	0,52	2,1	0,65	3,2	0,78	4,7	0,91	6,4	1,04	8,3	1,17	10,5
0,14	0,02	0,00	0,28	0,6	0,42	1,3	0,56	2,2	0,70	3,5	0,84	5,0	0,98	6,9	1,12	9,0	1,26	11,3
0,15	0,02	0,00	0,30	0,6	0,45	1,4	0,60	2,4	0,75	3,8	0,90	5,4	1,05	7,4	1,20	9,6	1,35	12,2
0,16	0,03	0,00	0,32	0,6	0,48	1,4	0,64	2,6	0,80	4,0	0,96	5,8	1,12	7,8	1,28	10,2	1,44	13,0
0,17	0,03	0,00	0,34	0,7	0,51	1,5	0,68	2,7	0,85	4,2	1,02	6,1	1,19	8,3	1,36	10,9	1,53	13,8
0,18	0,03	0,01	0,36	0,7	0,54	1,6	0,72	2,9	0,90	4,5	1,08	6,5	1,26	8,8	1,44	11,5	1,62	14,6
0,19	0,04	0,01	0,38	0,8	0,57	1,7	0,76	3,0	0,95	4,8	1,14	6,8	1,33	9,3	1,52	12,2	1,71	15,4
0,20	0,04	0,01	0,40	0,8	0,60	1,8	0,80	3,2	1,00	5,0	1,20	7,2	1,40	9,8	1,60	12,8	1,80	16,2

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
0,20	0,04	0,01	0,40	0,8	0,60	1,8	0,80	3,2	1,00	5,0	1,20	7,2	1,40	9,8	1,60	12,8	1,80	16,2
0,21	0,04	0,01	0,42	0,8	0,63	1,9	0,84	3,4	1,05	5,2	1,26	7,6	1,47	10,3	1,68	13,4	1,89	17,0
0,22	0,05	0,01	0,44	0,9	0,66	2,0	0,88	3,5	1,10	5,5	1,32	7,9	1,54	10,8	1,76	14,1	1,98	17,8
0,23	0,05	0,01	0,46	0,9	0,69	2,1	0,92	3,7	1,15	5,8	1,38	8,3	1,61	11,3	1,84	14,7	2,07	18,6
0,24	0,06	0,01	0,48	1,0	0,72	2,2	0,96	3,8	1,20	6,0	1,44	8,6	1,68	11,8	1,92	15,4	2,16	19,4
0,25	0,06	0,02	0,50	1,0	0,75	2,2	1,00	4,0	1,25	6,2	1,50	9,0	1,75	12,2	2,00	16,0	2,25	20,2
0,26	0,07	0,02	0,52	1,0	0,78	2,3	1,04	4,2	1,30	6,5	1,56	9,4	1,82	12,7	2,08	16,6	2,34	21,1
0,27	0,07	0,02	0,54	1,1	0,81	2,4	1,08	4,3	1,35	6,8	1,62	9,7	1,89	13,2	2,16	17,3	2,43	21,9
0,28	0,08	0,02	0,56	1,1	0,84	2,5	1,12	4,5	1,40	7,0	1,68	10,1	1,96	13,7	2,24	17,9	2,52	22,7
0,29	0,08	0,02	0,58	1,2	0,87	2,6	1,16	4,6	1,45	7,2	1,74	10,4	2,03	14,2	2,32	18,6	2,61	23,5
0,30	0,09	0,03	0,60	1,2	0,90	2,7	1,20	4,8	1,50	7,5	1,80	10,8	2,10	14,7	2,40	19,2	2,70	24,3
0,31	0,10	0,03	0,62	1,2	0,93	2,8	1,24	5,0	1,55	7,8	1,86	11,2	2,17	15,2	2,48	19,8	2,79	25,1
0,32	0,10	0,03	0,64	1,3	0,96	2,9	1,28	5,1	1,60	8,0	1,92	11,5	2,24	15,7	2,56	20,5	2,88	25,9
0,33	0,11	0,04	0,66	1,3	0,99	3,0	1,32	5,3	1,65	8,2	1,98	11,9	2,31	16,2	2,64	21,1	2,97	26,7
0,34	0,12	0,04	0,68	1,4	1,02	3,1	1,36	5,4	1,70	8,5	2,04	12,2	2,38	16,7	2,72	21,8	3,06	27,5
0,35	0,12	0,04	0,70	1,4	1,05	3,2	1,40	5,6	1,75	8,8	2,10	12,6	2,45	17,2	2,80	22,4	3,15	28,4
0,36	0,13	0,05	0,72	1,4	1,08	3,2	1,44	5,8	1,80	9,0	2,16	13,0	2,52	17,6	2,88	23,0	3,24	29,2
0,37	0,14	0,05	0,74	1,5	1,11	3,3	1,48	5,9	1,85	9,2	2,22	13,3	2,59	18,1	2,96	23,7	3,33	30,0
0,38	0,14	0,05	0,76	1,5	1,14	3,4	1,52	6,1	1,90	9,5	2,28	13,7	2,66	18,6	3,04	24,3	3,42	30,8
0,39	0,15	0,06	0,78	1,6	1,17	3,5	1,56	6,2	1,95	9,8	2,34	14,0	2,73	19,1	3,12	25,0	3,51	31,6
0,40	0,16	0,06	0,80	1,6	1,20	3,6	1,60	6,4	2,00	10,0	2,40	14,4	2,80	19,6	3,20	25,6	3,60	32,4

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
0,40	0,16	0,06	0,80	1,6	1,20	3,6	1,60	6,4	2,00	10,0	2,40	14,4	2,80	19,6	3,20	25,6	3,60	32,4
0,41	0,17	0,07	0,83	1,6	1,23	3,7	1,64	6,6	2,05	10,2	2,46	14,8	2,87	20,1	3,28	26,2	3,69	33,2
0,42	0,18	0,07	0,84	1,7	1,26	3,8	1,63	6,7	2,10	10,5	2,52	15,1	2,94	20,6	3,36	26,9	3,78	34,0
0,43	0,18	0,08	0,86	1,7	1,29	3,9	1,72	6,9	2,15	10,8	2,58	15,5	3,01	21,1	3,44	27,5	3,87	34,8
0,44	0,19	0,09	0,88	1,8	1,32	4,0	1,76	7,0	2,20	11,0	2,64	15,8	3,08	21,6	3,52	23,2	3,96	35,5
0,45	0,20	0,09	0,90	1,8	1,35	4,0	1,80	7,2	2,25	11,2	2,70	16,2	3,15	22,0	3,60	28,8	4,05	36,4
0,46	0,21	0,10	0,92	1,8	1,38	4,1	1,84	7,4	2,30	11,5	2,76	16,6	3,22	22,5	3,68	29,4	4,14	37,3
0,47	0,22	0,10	0,94	1,9	1,41	4,2	1,88	7,5	2,35	11,8	2,82	16,9	3,29	23,0	3,76	30,1	4,23	38,1
0,48	0,23	0,11	0,96	1,9	1,44	4,3	1,92	7,7	2,40	12,0	2,88	17,3	3,36	23,5	3,84	30,7	4,32	38,9
0,49	0,24	0,12	0,98	2,0	1,47	4,4	1,96	7,8	2,45	12,2	2,94	17,6	3,43	24,0	3,92	31,4	4,41	39,7
0,50	0,25	0,12	1,00	2,0	1,50	4,5	2,00	8,0	2,50	12,5	3,00	18,0	3,50	24,5	4,00	32,0	4,50	40,5
0,51	0,26	0,13	1,02	2,0	1,53	4,6	2,04	8,2	2,55	12,8	3,06	18,4	3,57	25,0	4,08	32,6	4,59	41,3
0,52	0,27	0,14	1,04	2,1	1,56	4,7	2,08	8,3	2,60	13,0	3,12	18,7	3,64	25,5	4,16	33,3	4,68	42,1
0,53	0,28	0,15	1,06	2,1	1,59	4,8	2,12	8,5	2,65	13,2	3,18	19,1	3,71	26,0	4,24	33,9	4,77	42,9
0,54	0,29	0,16	1,08	2,2	1,62	4,9	2,16	8,6	2,70	13,5	3,24	19,4	3,78	26,5	4,32	34,6	4,86	43,7
0,55	0,30	0,17	1,10	2,2	1,65	5,0	2,20	8,8	2,75	13,8	3,30	19,8	3,85	27,0	4,40	35,2	4,95	44,6
0,56	0,31	0,18	1,12	2,2	1,68	5,0	2,24	9,0	2,80	14,0	3,35	20,2	3,92	27,4	4,48	35,8	5,04	45,4
0,57	0,32	0,19	1,14	2,3	1,71	5,1	2,28	9,1	2,85	14,2	3,42	20,5	3,99	27,9	4,56	36,5	5,13	46,2
0,58	0,34	0,20	1,16	2,3	1,74	5,2	2,32	9,3	2,90	14,5	3,48	20,9	4,06	28,4	4,64	37,1	5,22	47,0
0,59	0,35	0,21	1,18	2,4	1,77	5,3	2,36	9,4	2,95	14,8	3,54	21,2	4,13	28,9	4,72	37,8	5,31	47,8
0,60	0,36	0,22	1,20	2,4	1,80	5,4	2,40	9,6	3,00	15,0	3,60	21,6	4,20	29,4	4,80	38,4	5,40	48,6

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
0,60	0,36	0,22	1,20	2,4	1,80	5,4	2,40	9,6	3,00	15,0	3,60	21,6	4,20	29,4	4,80	38,4	5,40	48,6
0,61	0,37	0,23	1,22	2,4	1,83	5,5	2,44	9,8	3,05	15,2	3,66	22,0	4,27	29,9	4,88	39,0	5,49	49,4
0,62	0,38	0,24	1,24	2,5	1,86	5,6	2,48	9,9	3,10	15,5	3,72	22,3	4,34	30,4	4,96	39,7	5,58	50,2
0,63	0,40	0,25	1,26	2,5	1,89	5,7	2,52	10,1	3,15	15,8	3,78	22,7	4,41	30,9	5,04	40,3	5,67	51,0
0,64	0,41	0,26	1,28	2,6	1,92	5,8	2,56	10,2	3,20	16,0	3,84	23,0	4,48	31,4	5,12	41,0	5,76	51,8
0,65	0,42	0,27	1,30	2,6	1,95	5,8	2,60	10,4	3,25	16,2	3,90	23,4	4,55	31,8	5,20	41,6	5,85	52,6
0,66	0,44	0,29	1,32	2,6	1,98	5,9	2,64	10,6	3,30	16,5	3,96	23,8	4,62	32,3	5,28	42,2	5,94	53,5
0,67	0,45	0,30	1,34	2,7	2,01	6,0	2,68	10,7	3,35	16,8	4,02	24,1	4,69	32,8	5,36	42,9	6,03	54,3
0,68	0,46	0,31	1,36	2,7	2,04	6,1	2,72	10,9	3,40	17,0	4,08	24,5	4,76	33,3	5,44	43,5	6,12	55,1
0,69	0,48	0,33	1,38	2,8	2,07	6,2	2,76	11,0	3,45	17,2	4,14	24,8	4,83	33,8	5,52	44,2	6,21	55,9
0,70	0,49	0,34	1,40	2,8	2,10	6,3	2,80	11,2	3,50	17,5	4,20	25,2	4,90	34,3	5,60	44,8	6,30	56,7
0,71	0,50	0,36	1,42	2,8	2,13	6,4	2,84	11,4	3,55	17,8	4,26	25,6	4,97	34,8	5,68	45,4	6,39	57,5
0,72	0,52	0,37	1,44	2,9	2,16	6,5	2,88	11,5	3,60	18,0	4,32	25,9	5,04	35,3	5,76	46,1	6,48	58,3
0,73	0,53	0,39	1,46	2,9	2,19	6,6	2,92	11,7	3,65	18,2	4,38	26,3	5,11	35,8	5,84	46,7	6,57	59,1
0,74	0,55	0,41	1,48	3,0	2,22	6,7	2,96	11,8	3,70	18,5	4,44	26,6	5,18	36,3	5,92	47,4	6,66	59,9
0,75	0,56	0,42	1,50	3,0	2,25	6,8	3,00	12,0	3,75	18,8	4,50	27,0	5,25	36,8	6,00	48,0	6,75	60,8
0,76	0,58	0,44	1,52	3,0	2,28	6,8	3,04	12,2	3,80	19,0	4,56	27,4	5,32	37,2	6,08	48,6	6,84	61,6
0,77	0,59	0,46	1,54	3,1	2,31	6,9	3,08	12,3	3,85	19,2	4,62	27,7	5,39	37,7	6,16	49,3	6,93	62,4
0,78	0,61	0,47	1,56	3,1	2,34	7,0	3,12	12,5	3,90	19,5	4,68	28,1	5,46	38,2	6,24	49,9	7,02	63,2
0,79	0,62	0,49	1,58	3,2	2,37	7,1	3,16	12,6	3,95	19,8	4,74	28,4	5,53	38,7	6,32	50,6	7,11	64,0
0,80	0,64	0,51	1,60	3,2	2,40	7,2	3,20	12,8	4,00	20,0	4,80	28,8	5,60	39,2	6,40	51,2	7,20	64,8

1			2		3		4		5		6		7		8			
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
0,80	0,64	0,51	1,60	3,2	2,40	7,2	3,20	12,8	4,00	20,0	4,80	28,8	5,60	39,2	6,40	51,2	7,20	64,8
0,81	0,66	0,53	1,62	3,2	2,43	7,3	3,24	13,0	4,05	20,2	4,86	29,2	5,67	39,7	6,48	51,8	7,29	65,6
0,82	0,67	0,55	1,64	3,3	2,46	7,4	3,28	13,1	4,10	20,5	4,92	29,5	5,74	40,2	6,56	52,5	7,38	66,4
0,83	0,69	0,57	1,66	3,3	2,49	7,5	3,32	13,3	4,15	20,8	4,98	29,9	5,81	40,7	6,64	53,1	7,47	67,2
0,84	0,71	0,59	1,68	3,4	2,52	7,6	3,36	13,4	4,20	21,0	5,04	30,2	5,88	41,2	6,72	53,8	7,56	68,0
0,85	0,72	0,61	1,70	3,4	2,55	7,6	3,40	13,6	4,25	21,2	5,10	30,6	5,95	41,6	6,80	54,4	7,65	68,8
0,86	0,74	0,64	1,72	3,4	2,58	7,7	3,44	13,8	4,30	21,5	5,16	31,0	6,02	42,1	6,88	55,0	7,74	69,7
0,87	0,76	0,66	1,74	3,5	2,61	7,8	3,48	13,9	4,35	21,8	5,22	31,3	6,09	42,6	6,96	55,7	7,83	70,5
0,88	0,77	0,68	1,76	3,5	2,64	7,9	3,52	14,1	4,40	22,0	5,28	31,7	6,16	43,1	7,04	56,3	7,92	71,3
0,89	0,79	0,70	1,78	3,6	2,67	8,0	3,56	14,2	4,45	22,2	5,34	32,0	6,23	43,6	7,12	57,0	8,01	72,1
0,90	0,81	0,73	1,80	3,6	2,70	8,1	3,60	14,4	4,50	22,5	5,40	32,4	6,30	44,1	7,20	57,6	8,10	72,9
0,91	0,83	0,75	1,82	3,6	2,73	8,2	3,64	14,6	4,55	22,8	5,46	32,8	6,37	44,6	7,23	58,2	8,19	73,7
0,92	0,85	0,78	1,84	3,7	2,76	8,3	3,68	14,7	4,60	23,0	5,52	33,1	6,44	45,1	7,36	58,9	8,28	74,5
0,93	0,86	0,80	1,86	3,7	2,79	8,4	3,72	14,9	4,65	23,2	5,58	33,5	6,51	45,6	7,44	59,5	8,37	75,3
0,94	0,88	0,83	1,88	3,8	2,82	8,5	3,76	15,0	4,70	23,5	5,64	33,8	6,58	46,1	7,52	60,2	8,46	76,1
0,95	0,90	0,86	1,90	3,8	2,85	8,6	3,80	15,2	4,75	23,8	5,70	34,2	6,65	46,6	7,60	60,8	8,55	77,0
0,96	0,92	0,88	1,92	3,8	2,88	8,6	3,84	15,4	4,80	24,0	5,76	34,6	6,72	47,0	7,68	61,4	8,64	77,8
0,97	0,94	0,91	1,94	3,9	2,91	8,7	3,88	15,5	4,85	24,2	5,82	34,9	6,79	47,5	7,76	62,1	8,73	78,6
0,98	0,96	0,94	1,96	3,9	2,94	8,8	3,92	15,7	4,90	24,5	5,88	35,3	6,86	48,0	7,84	62,7	8,82	79,4
0,99	0,98	0,97	1,98	4,0	2,97	8,9	3,96	15,8	4,95	24,8	5,94	35,6	6,93	48,5	7,92	63,4	8,91	80,2
1,00	1,00	1,00	2,00	4,0	3,00	9,0	4,00	16,0	5,00	25,0	6,00	36,0	7,00	49,0	8,00	64,0	9,00	81,0

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
1,00	1,00	1,00	2,00	4,0	3,00	9,0	4,00	16,0	5,00	25,0	6,00	36,0	7,00	49,0	8,00	64,0	9,00	81,0
1,01	1,02	1,03	2,02	4,0	3,03	9,1	4,04	16,2	5,05	25,2	6,06	36,4	7,07	49,5	8,08	64,6	9,09	81,8
1,02	1,04	1,06	2,04	4,1	3,06	9,2	4,03	16,3	5,10	25,5	6,12	36,7	7,14	50,0	8,16	65,3	9,18	82,6
1,03	1,06	1,09	2,06	4,1	3,09	9,3	4,12	16,5	5,15	25,8	6,18	37,1	7,21	50,5	8,24	65,9	9,27	83,4
1,04	1,08	1,12	2,08	4,2	3,12	9,4	4,16	16,6	5,20	26,0	6,24	37,4	7,28	51,0	8,32	66,6	9,36	84,2
1,05	1,10	1,16	2,10	4,2	3,15	9,4	4,20	16,8	5,25	26,2	6,30	37,8	7,35	51,4	8,40	67,2	9,45	85,0
1,06	1,12	1,19	2,12	4,2	3,18	9,5	4,24	17,0	5,30	26,5	6,36	38,2	7,42	51,9	8,48	67,8	9,54	85,9
1,07	1,14	1,23	2,14	4,3	3,21	9,6	4,28	17,1	5,35	26,8	6,42	33,5	7,49	52,4	8,56	68,5	9,63	86,7
1,08	1,17	1,26	2,16	4,3	3,24	9,7	4,32	17,3	5,40	27,0	6,48	38,9	7,56	52,9	8,64	69,1	9,72	87,5
1,09	1,19	1,30	2,18	4,4	3,27	9,8	4,36	17,4	5,45	27,2	6,54	39,2	7,63	53,4	8,72	69,8	9,81	88,3
1,10	1,21	1,33	2,20	4,4	3,30	9,9	4,40	17,6	5,50	27,5	6,60	39,6	7,70	53,9	8,80	70,4	9,90	89,1
1,11	1,23	1,37	2,22	4,4	3,33	10,0	4,44	17,8	5,55	27,8	6,66	40,0	7,77	54,4	8,88	71,0	9,99	89,9
1,12	1,25	1,40	2,24	4,5	3,36	10,1	4,48	17,9	5,60	28,0	6,72	40,3	7,84	54,9	8,96	71,7	10,08	90,7
1,13	1,28	1,44	2,26	4,5	3,39	10,2	4,52	18,1	5,65	28,2	6,78	40,7	7,91	55,4	9,04	72,3	10,17	91,5
1,14	1,30	1,48	2,28	4,6	3,42	10,3	4,56	18,9	5,70	28,5	6,84	41,0	7,98	55,9	9,12	73,0	10,26	92,3
1,15	1,32	1,52	2,30	4,6	3,45	10,4	4,60	18,9	5,75	28,8	6,90	41,4	8,05	56,4	9,20	73,6	10,35	93,2
1,16	1,35	1,56	2,32	4,6	3,48	10,4	4,64	18,6	5,80	29,0	6,96	41,8	8,12	56,8	9,28	74,2	10,44	94,0
1,17	1,37	1,60	2,34	4,7	3,51	10,5	4,68	18,1	5,85	29,2	7,02	42,1	8,19	57,3	9,36	74,9	10,53	94,8
1,18	1,39	1,64	2,36	4,7	3,54	10,6	4,72	18,2	5,90	29,5	7,08	42,5	8,26	57,8	9,44	75,5	10,62	95,6
1,19	1,42	1,69	2,38	4,8	3,57	10,7	4,76	18,6	5,99	29,8	7,14	42,8	8,33	58,3	9,52	76,2	10,71	96,4
1,20	1,44	1,73	2,40	4,8	3,60	10,8	4,80	0,71	0,40	30,0	7,20	43,2	8,40	58,8	9,60	76,8	10,80	97,2

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
1,20	1,44	1,73	2,40	4,8	3,60	10,8	4,80	19,2	6,00	30,0	7,20	43,2	8,40	58,8	9,60	76,8	10,80	97,2
1,21	1,46	1,77	2,42	4,8	3,63	10,9	4,84	19,4	6,05	30,2	7,26	43,6	8,47	59,3	9,68	77,4	10,89	98,0
1,22	1,49	1,82	2,44	4,9	3,66	11,0	4,88	19,5	6,10	30,5	7,32	43,9	8,54	59,8	9,76	78,1	10,98	98,8
1,23	1,51	1,86	2,46	4,9	3,69	11,1	4,92	19,7	6,15	30,8	7,38	44,3	8,61	60,3	9,84	78,7	11,07	99,5
1,24	1,54	1,91	2,48	5,0	3,72	11,2	4,96	19,8	6,20	31,0	7,44	44,6	8,68	60,8	9,92	79,4	11,16	100,4
1,25	1,56	1,95	2,50	5,0	3,75	11,2	5,00	20,0	6,25	31,2	7,50	45,0	8,75	61,2	10,00	80,0	11,25	101,2
1,26	1,59	2,00	2,52	5,0	3,78	11,3	5,04	20,2	6,30	31,5	7,56	45,4	8,82	61,7	10,08	80,6	11,34	102,1
1,27	1,61	2,05	2,54	5,1	3,81	11,4	5,08	20,3	6,35	31,8	7,62	45,7	8,89	62,2	10,16	81,3	11,43	102,9
1,28	1,64	2,10	2,56	5,1	3,84	11,5	5,12	20,5	6,40	32,0	7,68	46,1	8,96	62,7	10,24	81,9	11,52	103,7
1,29	1,66	2,15	2,58	5,2	3,87	11,6	5,16	20,6	6,45	32,2	7,74	46,4	9,03	63,2	10,32	82,6	11,61	104,5
1,30	1,69	2,20	2,60	5,2	3,90	11,7	5,20	20,8	6,50	32,5	7,80	46,8	9,10	63,7	10,40	83,2	11,70	105,3
1,31	1,72	2,25	2,62	5,2	3,93	11,8	5,24	21,0	6,55	32,8	7,86	47,2	9,17	64,2	10,48	83,8	11,79	106,1
1,32	1,74	2,30	2,64	5,3	3,96	11,9	5,28	21,1	6,60	33,0	7,92	47,5	9,24	64,7	10,56	84,5	11,88	106,9
1,33	1,77	2,35	2,66	5,3	3,99	12,0	5,32	21,3	6,65	33,2	7,98	47,9	9,31	65,2	10,64	85,1	11,97	107,7
1,34	1,80	2,41	2,68	5,4	4,02	12,1	5,36	21,4	6,70	33,5	8,04	48,2	9,38	65,7	10,72	85,8	12,06	108,5
1,35	1,82	2,46	2,70	5,4	4,05	12,2	5,40	21,6	6,75	33,8	8,10	48,6	9,45	66,2	10,80	86,4	12,15	109,4
1,36	1,85	2,52	2,72	5,4	4,08	12,2	5,44	21,8	6,80	34,0	8,16	49,0	9,52	66,6	10,88	87,0	12,24	110,2
1,37	1,88	2,57	2,74	5,5	4,11	12,3	5,48	21,9	6,85	34,2	8,22	49,3	9,59	67,1	10,96	87,7	12,33	111,0
1,38	1,90	2,63	2,76	5,5	4,14	12,4	5,52	22,1	6,90	34,5	8,28	49,7	9,66	67,6	11,04	88,3	12,42	111,8
1,39	1,93	2,69	2,78	5,6	4,17	12,5	5,56	22,2	6,95	34,8	8,34	50,0	9,73	68,1	11,12	89,0	12,51	112,6
1,40	1,96	2,74	2,80	5,6	4,20	12,6	5,60	22,4	7,00	35,0	8,40	50,4	9,80	68,6	11,20	89,6	12,60	113,4

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
1,40	1,96	2,74	2,80	5,6	4,20	12,6	5,60	22,4	7,00	35,0	8,40	50,4	9,80	68,6	11,20	89,6	12,60	113,4
1,41	1,99	2,80	2,82	5,6	4,23	12,7	5,64	22,6	7,05	35,2	8,46	50,8	9,87	69,1	11,28	90,2	12,69	114,2
1,42	2,02	2,86	2,84	5,7	4,26	12,8	5,68	22,7	7,10	35,5	8,52	51,1	9,94	69,6	11,36	90,9	12,78	115,0
1,43	2,04	2,92	2,86	5,7	4,29	12,9	5,72	22,9	7,15	35,8	8,58	51,5	10,01	70,1	11,44	91,5	12,87	115,8
1,44	2,07	2,99	2,88	5,8	4,32	13,0	5,76	23,0	7,20	36,0	8,64	51,8	10,08	70,6	11,52	92,2	12,96	116,6
1,45	2,10	3,05	2,90	5,8	4,35	13,0	5,80	23,2	7,25	36,2	8,70	52,2	10,15	71,0	11,60	92,8	13,05	117,4
1,46	2,13	3,11	2,92	5,8	4,38	13,1	5,84	23,4	7,30	36,5	8,76	52,6	10,22	71,5	11,68	93,4	13,14	118,3
1,47	2,16	3,18	2,94	5,9	4,41	13,2	5,88	23,5	7,35	36,8	8,82	52,9	10,29	72,0	11,76	94,1	13,23	119,1
1,48	2,19	3,24	2,96	5,9	4,44	13,3	5,92	23,7	7,40	37,0	8,88	53,3	10,36	72,5	11,84	94,7	13,32	119,9
1,49	2,22	3,31	2,98	6,0	4,47	13,4	5,96	23,8	7,45	37,2	8,94	53,6	10,43	73,0	11,92	95,4	13,41	120,7
1,50	2,25	3,38	3,00	6,0	4,50	13,5	6,00	24,0	7,50	37,5	9,00	54,0	10,50	73,5	12,00	96,0	13,50	121,5
1,51	2,28	3,44	3,02	6,0	4,53	13,6	6,04	24,2	7,55	37,8	9,06	54,4	10,57	74,0	12,08	96,6	13,59	122,3
1,52	2,31	3,51	3,04	6,1	4,56	13,7	6,08	24,3	7,60	38,0	9,12	54,7	10,64	74,5	12,16	97,3	13,68	123,1
1,53	2,34	3,58	3,06	6,1	4,59	13,8	6,12	24,5	7,65	38,2	9,18	55,1	10,71	75,0	12,24	97,9	13,77	123,9
1,54	2,37	3,65	3,08	6,2	4,62	13,9	6,16	24,6	7,70	38,5	9,24	55,4	10,78	75,5	12,32	98,6	13,86	124,7
1,55	2,40	3,72	3,10	6,2	4,65	14,0	6,20	24,8	7,75	38,8	9,30	55,8	10,85	76,0	12,40	99,2	13,95	125,6
1,56	2,43	3,80	3,12	6,2	4,68	14,0	6,24	25,0	7,80	39,0	9,36	56,2	10,92	76,4	12,48	99,8	14,04	126,4
1,57	2,46	3,87	3,14	6,3	4,71	14,1	6,28	25,1	7,85	39,2	9,42	56,5	10,99	76,9	12,56	100,5	14,13	127,2
1,58	2,50	3,94	3,16	6,3	4,74	14,2	6,32	25,3	7,90	39,5	9,48	56,9	11,06	77,4	12,64	101,1	14,22	128,0
1,59	2,53	4,02	3,18	6,4	4,77	14,3	6,36	25,4	7,95	39,8	9,54	57,2	11,13	77,9	12,72	101,8	14,31	128,8
1,60	2,56	4,10	3,20	6,4	4,80	14,4	6,40	25,6	8,00	40,0	9,60	57,6	11,20	78,4	12,80	102,4	14,40	129,6

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
1,60	2,56	4,10	3,20	6,4	4,80	14,4	6,40	25,6	8,00	40,0	9,60	57,6	11,20	78,4	12,80	102,4	14,40	129,6
1,61	2,59	4,17	3,22	6,4	4,83	14,5	6,44	25,8	8,05	40,2	9,66	58,0	11,27	78,9	12,88	103,0	14,49	130,4
1,62	2,62	4,25	3,24	6,5	4,86	14,6	6,48	25,9	8,10	40,5	9,72	58,3	11,34	79,4	12,96	103,7	14,58	131,2
1,63	2,66	4,33	3,26	6,5	4,89	14,7	6,52	26,1	8,15	40,8	9,78	58,7	11,41	79,9	13,04	104,3	14,67	132,0
1,64	2,69	4,41	3,28	6,6	4,92	14,8	6,56	26,2	8,20	41,0	9,84	59,0	11,48	80,4	13,12	105,0	14,76	132,8
1,65	2,72	4,49	3,30	6,6	4,95	14,8	6,60	26,4	8,25	41,2	9,90	59,4	11,55	80,8	13,20	105,6	14,85	133,6
1,66	2,76	4,57	3,32	6,6	4,98	14,9	6,64	26,6	8,30	41,5	9,96	59,8	11,62	81,3	13,28	106,2	14,94	134,5
1,67	2,79	4,66	3,34	6,7	5,01	15,0	6,68	26,7	8,35	41,8	10,02	60,1	11,69	81,8	13,36	106,9	15,03	135,3
1,68	2,82	4,74	3,36	6,7	5,04	15,1	6,72	26,9	8,40	42,0	10,08	60,5	11,76	82,3	13,44	107,5	15,12	136,1
1,69	2,86	4,83	3,38	6,8	5,07	15,2	6,76	27,0	8,45	42,2	10,14	60,8	11,83	82,8	13,52	108,2	15,21	136,9
1,70	2,89	4,91	3,40	6,8	5,10	15,3	6,80	27,2	8,50	42,5	10,20	61,2	11,90	83,3	13,60	108,8	15,30	137,7
1,71	2,92	5,00	3,42	6,8	5,13	15,4	6,84	27,4	8,55	42,8	10,26	61,6	11,97	83,8	13,68	109,4	15,39	138,5
1,72	2,96	5,09	3,44	6,9	5,16	15,5	6,88	27,5	8,60	43,0	10,32	61,9	12,04	84,3	13,76	110,1	15,48	139,3
1,73	2,99	5,18	3,46	6,9	5,19	15,6	6,92	27,7	8,65	43,2	10,38	62,3	12,11	84,8	13,84	110,7	15,57	140,1
1,74	3,03	5,27	3,48	7,0	5,22	15,7	6,96	27,8	8,70	43,5	10,44	62,6	12,18	85,3	13,92	111,4	15,66	140,9
1,75	3,06	5,36	3,50	7,0	5,25	15,8	7,00	28,0	8,75	43,8	10,50	63,0	12,25	85,8	14,00	112,0	15,75	141,8
1,76	3,10	5,45	3,52	7,0	5,28	15,8	7,04	28,2	8,80	44,0	10,56	63,4	12,32	86,2	14,08	112,6	15,84	142,6
1,77	3,13	5,55	3,54	7,1	5,31	15,9	7,08	28,3	8,85	44,2	10,62	63,7	12,39	86,7	14,16	113,3	15,93	143,4
1,78	3,17	5,64	3,56	7,1	5,34	16,0	7,12	28,5	8,90	44,5	10,68	64,1	12,46	87,2	14,24	113,9	16,02	144,2
1,79	3,20	5,74	3,58	7,2	5,37	16,1	7,16	28,6	8,95	44,8	10,74	64,4	12,53	87,7	14,32	114,6	16,11	145,0
1,80	3,24	5,83	3,60	7,2	5,40	16,2	7,20	28,8	9,00	45,0	10,80	64,8	12,60	88,2	14,40	115,2	16,20	145,8

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
1,80	3,24	5,83	3,60	7,2	5,40	16,2	7,20	28,8	9,00	45,0	10,80	64,8	12,60	88,2	14,40	115,2	16,20	145,8
1,81	3,28	5,93	3,62	7,2	5,43	16,3	7,24	29,0	9,05	45,2	10,86	65,2	12,67	88,7	14,48	115,8	16,29	146,6
1,82	3,31	6,03	3,64	7,3	5,46	16,4	7,28	29,1	9,10	45,5	10,92	65,5	12,74	89,2	14,56	116,5	16,38	147,4
1,83	3,35	6,13	3,66	7,3	5,49	16,5	7,32	29,3	9,15	45,8	10,98	65,9	12,81	89,7	14,64	117,1	16,47	148,2
1,84	3,39	6,23	3,68	7,4	5,52	16,6	7,36	29,4	9,20	46,0	11,04	66,2	12,88	90,2	14,72	117,8	16,56	149,0
1,85	3,42	6,33	3,70	7,4	5,55	16,6	7,40	29,6	9,25	46,2	11,10	66,6	12,95	90,6	14,80	118,4	16,65	149,8
1,86	3,46	6,43	3,72	7,4	5,58	16,7	7,44	29,8	9,30	46,5	11,16	67,0	13,02	91,1	14,88	119,0	16,74	150,7
1,87	3,50	6,54	3,74	7,5	5,61	16,8	7,48	29,9	9,35	46,8	11,22	67,3	13,09	91,6	14,96	119,7	16,83	151,5
1,88	3,53	6,64	3,76	7,5	5,64	16,9	7,52	30,1	9,40	47,0	11,28	67,7	13,16	92,1	15,04	120,3	16,92	152,3
1,89	3,57	6,75	3,78	7,6	5,67	17,0	7,56	30,2	9,45	47,2	11,34	68,0	13,23	92,6	15,12	121,0	17,01	153,1
1,90	3,61	6,86	3,80	7,6	5,70	17,1	7,60	30,4	9,50	47,5	11,40	68,4	13,30	93,1	15,20	121,6	17,10	153,9
1,91	3,65	6,97	3,82	7,6	5,73	17,2	7,64	30,6	9,55	47,8	11,46	68,8	13,37	93,6	15,28	122,2	17,19	154,7
1,92	3,69	7,08	3,84	7,7	5,76	17,3	7,68	30,7	9,60	48,0	11,52	69,1	13,44	94,1	15,36	122,9	17,28	155,5
1,93	3,72	7,19	3,86	7,7	5,79	17,4	7,72	30,9	9,65	48,2	11,58	69,5	13,51	94,6	15,44	123,5	17,37	156,3
1,94	3,76	7,30	3,88	7,8	5,82	17,5	7,76	31,0	9,70	48,5	11,64	69,8	13,58	95,1	15,52	124,2	17,46	157,1
1,95	3,80	7,41	3,90	7,8	5,85	17,6	7,80	31,2	9,75	48,8	11,70	70,2	13,65	95,6	15,60	124,8	17,55	158,0
1,96	3,84	7,53	3,92	7,8	5,88	17,6	7,84	31,4	9,80	49,0	11,76	70,6	13,72	96,0	15,68	125,4	17,64	158,8
1,97	3,88	7,65	3,94	7,9	5,91	17,7	7,88	31,5	9,85	49,2	11,82	70,9	13,79	96,5	15,76	126,1	17,73	159,6
1,98	3,92	7,76	3,96	7,9	5,94	17,8	7,92	31,7	9,90	49,5	11,88	71,3	13,86	97,0	15,84	126,7	17,82	160,4
1,99	3,96	7,88	3,98	8,0	5,97	17,9	7,96	31,8	9,95	49,8	11,94	71,6	13,93	97,5	15,92	127,4	17,91	161,2
2,00	4,00	8,00	4,00	8,0	6,00	18,0	8,00	32,0	10,00	50,0	12,00	72,0	14,00	98,0	16,00	128,0	18,00	162,0

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
2,00	4,00	8,00	4,00	8	6,00	18	8,00	32	10,00	50	12,00	72	14,00	98	16,00	128	18,00	162
2,01	4,04	8,12	4,02	8	6,03	18	8,04	32	10,05	50	12,06	72	14,07	98	16,08	129	18,09	163
2,02	4,08	8,24	4,04	8	6,06	18	8,08	32	10,10	50	12,12	73	14,14	99	16,16	129	18,18	164
2,03	4,12	8,37	4,06	8	6,09	18	8,12	32	10,15	51	12,18	73	14,21	99	16,24	130	18,27	164
2,04	4,16	8,49	4,08	8	6,12	18	8,16	33	10,20	51	12,24	73	14,28	100	16,32	131	18,36	165
2,05	4,20	8,62	4,10	8	6,15	18	8,20	33	10,25	51	12,30	74	14,35	100	16,40	131	18,45	166
2,06	4,24	8,74	4,12	8	6,18	19	8,24	33	10,30	52	12,36	74	14,42	101	16,48	132	18,54	167
2,07	4,28	8,87	4,14	8	6,21	19	8,28	33	10,35	52	12,42	74	14,49	101	16,56	132	18,63	168
2,08	4,33	9,00	4,16	8	6,24	19	8,32	33	10,40	52	12,48	75	14,56	102	16,64	133	18,72	168
2,09	4,37	9,13	4,18	8	6,27	19	8,36	33	10,45	52	12,54	75	14,63	102	16,72	134	18,81	169
2,10	4,41	9,26	4,20	8	6,30	19	8,40	34	10,50	52	12,60	76	14,70	103	16,80	134	18,90	170
2,11	4,45	9,39	4,22	8	6,33	19	8,44	34	10,55	53	12,66	76	14,77	103	16,88	135	18,99	171
2,12	4,49	9,53	4,24	8	6,36	19	8,48	34	10,60	53	12,72	76	14,84	104	16,96	136	19,08	172
2,13	4,54	9,66	4,26	9	6,39	19	8,52	34	10,65	53	12,78	77	14,91	104	17,04	136	19,17	172
2,14	4,58	9,80	4,28	9	6,42	19	8,56	34	10,70	54	12,84	77	14,98	105	17,12	137	19,26	173
2,15	4,62	9,94	4,30	9	6,45	19	8,60	34	10,75	54	12,90	77	15,05	105	17,20	138	19,35	174
2,16	4,67	10,08	4,32	9	6,48	19	8,64	34	10,80	54	12,96	78	15,12	106	17,28	138	19,44	175
2,17	4,71	10,22	4,34	9	6,51	20	8,68	35	10,85	54	13,02	78	15,19	106	17,36	139	19,53	176
2,18	4,75	10,36	4,36	9	6,54	20	8,72	35	10,90	54	13,08	78	15,26	107	17,44	140	19,62	177
2,19	4,80	10,50	4,38	9	6,57	20	8,76	35	10,95	55	13,14	79	15,33	107	17,52	140	19,71	177
2,20	4,84	10,65	4,40	9	6,60	20	8,80	35	11,00	55	13,20	79	15,40	108	17,60	141	19,80	178

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
2,20	4,84	10,65	4,40	9	6,60	20	8,80	35	11,00	55	13,20	79	15,40	108	17,60	141	19,80	178
2,21	4,88	10,79	4,42	9	6,63	20	8,84	35	11,05	55	13,26	80	15,47	108	17,68	141	19,89	179
2,22	4,93	10,94	4,44	9	6,66	20	8,88	36	11,10	56	13,32	80	15,54	109	17,76	142	19,98	180
2,23	4,97	11,09	4,46	9	6,69	20	8,92	36	11,15	56	13,38	80	15,61	109	17,84	143	20,07	181
2,24	5,02	11,24	4,48	9	6,72	20	8,96	36	11,20	56	13,44	81	15,68	110	17,92	143	20,16	181
2,25	5,06	11,39	4,50	9	6,75	20	9,00	36	11,25	56	13,50	81	15,75	110	18,00	144	20,25	182
2,26	5,11	11,51	4,52	9	6,78	20	9,04	36	11,30	56	13,56	81	15,82	111	18,08	145	20,34	183
2,27	5,15	11,70	4,51	9	6,81	20	9,08	36	11,35	57	13,62	82	15,89	111	18,16	146	20,43	184
2,28	5,20	11,85	4,56	9	6,84	21	9,12	36	11,40	57	13,68	82	15,96	112	18,21	146	20,52	185
2,29	5,24	12,01	4,58	9	6,87	21	9,16	37	11,45	57	13,74	82	16,03	112	18,32	147	20,61	185
2,30	5,29	12,17	4,60	9	6,90	21	9,20	37	11,50	58	13,80	83	16,10	113	18,40	147	20,70	186
2,31	5,34	12,33	4,62	9	6,93	21	9,21	37	11,55	58	13,86	83	16,17	113	18,48	148	20,79	187
2,32	5,38	12,49	4,64	9	6,96	21	9,28	37	11,60	58	13,92	84	16,24	114	18,56	148	20,88	188
2,33	5.43	12,65	4,66	9	6,99	21	9,32	37	11,65	58	13,98	84	16,31	114	18,64	149	20,97	189
2,34	5,48	12,81	4,68	9	7,02	21	9,36	37	11,70	58	14,04	84	16,38	115	18,72	150	21,06	190
2,35	5,52	12,98	4,70	9	7,05	21	9,40	38	11,75	59	14,10	85	16,45	115	18,80	150	21,15	190
2,36	5,57	13,14	4,72	9	7,08	21	9,44	38	11,80	59	14,16	85	16,52	116	18,88	151	21,24	191
2,37	5,62	13,31	4,74	9	7,11	21	9,48	38	11,85	59	14,22	85	16,59	116	18,96	152	21,33	192
2,38	5,66	13,48	4,76	10	7,14	21	9,52	38	11,90	60	14,28	86	16,66	117	19,04	152	21,42	193
2,39	5,71	13,65	4,78	10	7,17	22	9,56	38	11,95	60	14,34	86	16,73	117	19,12	153	21,51	194
2,40	5.76	13,82	4,80	10	7,20	22	9,60	38	12,00	60	14,40	86	16,80	118	19,20	154	21,60	194

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
2,40	5,76	13,82	4,80	10	7,20	22	9,60	38	12,00	60	14,40	86	16,80	118	19,20	154	21,60	194
2.41	5,81	14,00	4,82	10	7,23	22	9,64	39	12,05	60	14,46	87	16,87	118	19,28	154	21,69	195
2,42	5,86	14,17	4,84	10	7,26	22	9,68	39	12,10	60	14,52	87	16,94	119	19,36	155	21.78	196
2,43	5,90	14,35	4,86	10	7,29	22	9,72	39	12,15	61	14,58	87	17,01	119	19,44	156	21,87	197
2,44	5,95	14,53	4,88	10	7,32	22	9,76	39	12,20	61	14,64	88	17,08	120	19,52	156	21.96	198
2,45	6.00	14,71	4,90	10	7,35	22	9,80	39	12,25	61	14,70	88	17,15	120	19,60	157	22,05	198
2,46	6,05	14,89	4,92	10	7,38	22	9,84	39	12,30	62	14,76	89	17,22	120	19,68	157	22,14	199
2,47	6,10	15,07	4,94	10	7,41	22	9,88	40	12,35	62	14,82	89	17,29	121	19,76	158	22,23	200
2,48	6,15	15,25	4,96	10	7,44	22	9,92	40	12,40	62	14,88	89	17,36	122	19,84	159	22,32	201
2,49	6,20	15,44	4,98	10	7,47	22	9,96	40	12,45	62	14,94	90	17,43	122	19,92	159	22,41	202
2,50	6,25	15,62	5,00	10	7,50	22	10,00	40	12,50	62	15,00	90	17,50	122	20,00	160	22,50	202
2,51	6,30	15,81	5,02	10	7,53	23	10,04	40	12,55	63	15,06	90	17,57	123	20,08	161	22,59	203
2,52	6,35	16,00	5,04	10	7,56	23	10,08	40	12,60	63	15,12	91	17,64	123	20,16	161	22,68	204
2,53	6,40	16,19	5,06	10	7,59	23	10,12	40	12,65	63	15,18	91	17,71	124	20,24	162	22,77	205
2,54	6,45	16,39	5,08	10	7,62	23	10,16	41	12,70	64	15,24	91	17,78	124	20,32	163	22,86	206
2,55	6,50	16,58	5,10	10	7,65	23	10,20	41	12,75	64	15,30	92	17,85	125	20,40	163	22,95	207
2,56	6,55	16,78	5,12	10	7,68	23	10,24	41	12,80	64	15,36	92	17,92	125	20,48	164	23,04	207
2,57	6,60	16,97	5,14	10	7,71	23	10,28	41	12,85	64	15,42	92	17,99	126	20,56	164	23,13	208
2,58	6,66	17,17	5,16	10	7,74	23	10,32	41	12,90	64	15,48	93	18,06	126	20,64	165	23,22	209
2,59	6,71	17,37	5,18	10	7,77	23	10,36	41	12,95	65	15,54	93	18,13	127	20,72	166	23,31	210
2,60	6,76	17,58	5,20	10	7,80	23	10,40	42	13,00	65	15,60	94	18,20	127	20,80	166	23,40	211

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
2,60	6,76	17,58	5,20	10	7,80	23	10,40	42	13,00	65	15,60	94	18,20	127	20,80	166	23,40	211
2,61	6,81	17,78	5,22	10	7,83	23	10,44	42	13,05	65	15,66	94	18,27	128	20,88	167	23,49	211
2,62	6,86	17,98	5,24	10	7,86	24	10,48	42	13,10	66	15,72	94	18,34	128	20,96	168	23,58	212
2,63	6,92	18,19	5,26	11	7,89	24	10,52	42	13,15	66	15,78	95	18,41	129	21,04	168	23,67	213
2,64	6,97	18,40	5,28	11	7,92	24	10,56	42	13,20	66	15,81	95	18,48	129	21,12	169	23,76	214
2,65	7,02	18,61	5,30	11	7,95	24	10,60	42	13,25	66	15,90	95	18,55	130	21,20	170	23,85	215
2,66	7,08	18,82	5,32	11	7,98	24	10,64	43	13,30	66	15,96	96	18,62	130	21,28	170	23,94	215
2,67	7,13	19,03	5,34	11	8,01	24	10,68	43	13,35	67	16,02	96	18,69	131	21,36	171	24,03	216
2,68	7,18	19,25	5,36	11	8,04	24	10,72	43	13,40	67	16,08	96	18,76	131	21,44	172	24,12	217
2,69	7,24	19,47	5,38	11	8,07	24	10,76	43	13,45	67	16,14	97	18,83	132	21,52	172	24,21	218
2,70	7,29	19,68	5,40	11	8,10	24	10,80	43	13,50	68	16,20	97	18,90	132	21,60	173	24,30	219
2,71	7,34	19,90	5,42	11	8,13	24	10,84	43	13,55	68	16,26	98	18,97	133	21,68	173	24,39	220
2,72	7,40	20,12	5,44	11	8,16	24	10,88	44	13,60	68	16,32	98	19,04	133	21,76	174	24,48	220
2,73	7,45	20,35	5,46	11	8,19	25	10,92	44	13,65	68	16,38	98	19,11	134	21,84	175	24,57	221
2,74	7,51	20,57	5,48	11	8,22	25	10,96	44	13,70	68	16,44	99	19,18	134	21,92	175	24,66	222
2,75	7,56	20,80	5,50	11	8,25	25	11,00	44	13,75	69	16,50	99	19,25	135	22,00	176	24,75	223
2,76	7,62	21,02	5,52	11	8,28	25	11,04	44	13,80	69	16,56	99	19,32	135	22,08	177	24,84	224
2,77	7,67	21,25	5,54	11	8,31	25	11,08	44	13,85	69	16,62	100	19,39	136	22,16	177	24,93	224
2,78	7,73	21,48	5,56	11	8,34	25	11,12	44	13,90	70	16,68	100	19,46	136	22,24	178	25,02	225
2,79	7,78	21,72	5,58	11	8,37	25	11,16	45	13,95	70	16,74	100	19,53	137	22,32	179	25,11	226
2,80	7,84	21,95	5,60	11	8,40	25	11,20	45	14,00	70	16,80	101	19,60	137	22,40	179	25,20	227

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
2,80	7,84	22,0	5,60	11	8,40	25	11,20	45	14,00	70	16,80	101	19,60	137	22,40	179	25,20	227
2,81	7,90	22,2	5,62	11	8,43	25	11,24	45	14,05	70	16,86	101	19,67	138	22,48	180	25,29	227
2,82	7,95	22,4	5,64	11	8,46	25	11,28	45	14,10	70	16,92	102	19,74	138	22,56	180	25,38	228
2,83	8,01	22,7	5,66	11	8,49	25	11,32	45	14,15	71	16,98	102	19,81	139	22,64	181	25,47	229
2,84	8,07	22,9	5,68	11	8,52	26	11,36	45	14,20	71	17,04	102	19,88	139	22,72	182	25,56	230
2,85	8,12	23,1	5,70	11	8,55	26	11,40	46	14,25	71	17,10	103	19,95	140	22,80	182	25,65	231
2,86	8,18	23,4	5,72	11	8,58	26	11,44	46	14,30	72	17,16	103	20,02	140	22,88	183	25,74	232
2,87	8,24	23,6	5,74	11	8,61	26	11,48	46	14,35	72	17,22	103	20,09	141	22,96	184	25,83	232
2,88	8,29	23,9	5,76	12	8,64	26	11,52	46	14,40	72	17,28	104	20,16	141	23,04	184	25,92	233
2,89	8,35	24,1	5,78	12	8,67	26	11,56	46	14,45	72	17,34	104	20,23	142	23,12	185	26,01	234
2,90	8,41	24,4	5,80	12	8,70	26	11,60	46	14,50	72	17,40	104	20,30	142	23,20	186	26,10	235
2,91	8,47	24,6	5,82	12	8,73	26	11,64	47	14,55	73	17,46	105	20,37	143	23,28	186	26,19	236
2,92	8,53	24,9	5,84	12	8,76	26	11,68	47	14,60	73	17,52	105	20,44	143	23,36	187	26,28	236
2,93	8,58	25,2	5,86	12	8,79	26	11,72	47	14,65	73	17,58	105	20,51	144	23,44	188	26,37	237
2,94	8,64	25,4	5,88	12	8,82	26	11,76	47	14,70	74	17,64	106	20,58	144	23,52	188	26,46	238
2,95	8,70	25,7	5,90	12	8,85	27	11,80	47	14,75	74	17,70	106	20,65	145	23,60	189	26,55	239
2,96	8,76	25,9	5,92	12	8,88	27	11,84	47	14,80	74	17,76	107	20,72	145	23,68	189	26,64	240
2,97	8,82	26,2	5,94	12	8,91	27	11,88	48	14,85	74	17,82	107	20,79	146	23,76	190	26,73	241
2,98	8,88	26,5	5,96	12	8,94	27	11,92	48	14,90	74	17,88	107	20,86	146	23,84	191	26,82	241
2,99	8,94	26,7	5,98	12	8,97	27	11,96	48	14,95	75	17,94	108	20,93	147	23,92	191	26,91	242
3,00	9,00	27,0	6,00	12	9,00	27	12,00	48	15,00	75	18,00	108	21,00	147	24,00	192	27,00	243

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
3,00	9,00	27,0	6,00	12	9,00	27	12,00	48	15,00	75	18,00	108	21,00	147	24,00	192	27,00	243
3,01	9,06	27,3	6,02	12	9,03	27	12,04	48	15,05	75	18,06	108	21,07	147	24,08	193	27,09	244
3,02	9,12	27,5	6,04	12	9,06	27	12,08	48	15,10	76	18,12	109	21,14	148	24,16	193	27,18	245
3,03	9,18	27,8	6,06	12	9,09	27	12,12	48	15,15	76	18,18	109	21,21	148	24,24	194	27,27	245
3,04	9,24	28,1	6,08	12	9,12	27	12,16	49	15,20	76	18,24	109	21,28	149	24,32	195	27,36	246
3,05	9,30	28,4	6,10	12	9,15	27	12,20	49	15,25	76	18,30	110	21,35	149	24,40	195	27,45	247
3,06	9,36	28,7	6,12	12	9,18	28	12,24	49	15,30	76	18,36	110	21,42	150	24,48	196	27,54	248
3,07	9,42	28,9	6,14	12	9,21	28	12,28	49	15,35	77	18,42	110	21,49	150	24,56	196	27,63	249
3,08	9,49	29,2	6,16	12	9,24	28	12,32	49	15,40	77	18,48	111	21,56	150	24,64	197	27,72	249
3,09	9,55	29,5	6,18	12	9,27	28	12,36	49	15,45	77	18,54	111	21,63	151	24,72	198	27,81	250
3,10	9,61	29,8	6,20	12	9,30	28	12,40	50	15,50	78	18,60	112	21,70	152	24,80	198	27,90	251
3,11	9,67	30,1	6,22	12	9,33	28	12,44	50	15,55	78	18,66	112	21,77	152	24,88	199	27,99	252
3,12	9,73	30,4	6,24	12	9,36	28	12,48	50	15,60	78	18,72	112	21,84	153	24,96	200	28,08	253
3,13	9,80	30,7	6,26	13	9,39	28	12,52	50	15,65	78	18,78	113	21,91	153	25,04	200	28,17	254
3,14	9,86	31,0	6,28	13	9,42	28	12,56	50	15,70	78	18,84	113	21,98	154	25,12	201	28,26	254
3,15	9,92	31,3	6,30	13	9,45	28	12,60	50	15,75	79	18,90	113	22,05	154	25,20	202	28,35	255
3,16	9,99	31,6	6,32	13	9,48	28	12,64	51	15,80	79	18,96	114	22,12	155	25,28	202	28,44	256
3,17	10,05	31,9	6,34	13	9,51	29	12,68	51	15,85	79	19,02	114	22,19	155	25,36	203	28,53	257
3,18	10,11	32,2	6,36	13	9,54	29	12,72	51	15,90	80	19,08	114	22,26	156	25,44	204	28,62	258
3,19	10,18	32,5	6,38	13	9,57	29	12,76	51	15,95	80	19,14	115	22,33	156	25,52	204	28,71	258
3,20	10,24	32,8	6,40	13	9,60	29	12,80	51	16,00	80	19,20	115	22,40	157	25,60	205	28,80	259

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
3,20	10,24	32,8	6,40	13	9,60	29	12,80	51	16,00	80	19,20	115	22,40	157	25,60	205	28,80	259
3,21	10,30	33,1	6,42	13	9,63	29	12,84	51	16,05	80	19,26	116	22,47	157	25,68	205	28,89	260
3,22	10,37	33,4	6,44	13	9,66	29	12,88	52	16,10	80	19,32	116	22,54	158	25,76	206	28,98	261
3,23	10,43	33,7	6,46	13	9,69	29	12,92	52	16,15	81	19,38	116	22,61	158	25,84	207	29,07	262
3,24	10,50	34,0	6,48	13	9,72	29	12,96	52	16,20	81	19,44	117	22,68	159	25,92	207	29,16	262
3,25	10,56	34,3	6,50	13	9,75	29	13,00	52	16,25	81	19,50	117	22,75	159	26,00	208	29,25	263
3,26	10,63	34,6	6,52	13	9,78	29	13,04	52	16,30	82	19,56	117	22,82	160	26,08	209	29,34	264
3,27	10,69	35,0	6,54	13	9,81	29	13,08	52	16,35	82	19,62	118	22,89	160	26,16	209	29,43	265
3,28	10,76	35,3	6,56	13	9,84	30	13,12	52	16,40	82	19,68	118	22,96	161	26,24	210	29,52	266
3,29	10,82	35,6	6,58	13	9,87	30	13,16	53	16,45	82	19,74	118	23,03	161	26,32	211	29,61	266
3,30	10,89	35,9	6,60	13	9,90	30	13,20	53	16,50	82	19,80	119	23,10	162	26,40	211	29,70	267
3,31	10,96	36,3	6,62	13	9,93	30	13,24	53	16,55	83	19,86	119	23,17	162	26,48	212	29,79	268
3,32	11,02	36,6	6,64	13	9,96	30	13,28	53	16,60	83	19,92	120	23,24	163	26,56	212	29,88	269
3,33	11,09	36,9	6,66	13	9,99	30	13,32	53	16,65	83	19,98	120	23,31	163	26,64	213	29,97	270
3,34	11,16	37,3	6,68	13	10,02	30	13,36	53	16,70	84	20,04	120	23,38	164	26,72	214	30,06	271
3,35	11,22	37,6	6,70	13	10,05	30	13,40	54	16,75	84	20,10	121	23,45	164	26,80	214	30,15	271
3,36	11,29	37,9	6,72	13	10,08	30	13,44	54	16,80	84	20,16	121	23,52	165	26,88	215	30,24	272
3,37	11,36	38,3	6,74	13	10,11	30	13,48	54	16,85	84	20,22	121	23,59	165	26,96	216	30,33	273
3,38	11,42	38,6	6,76	14	10,14	30	13,52	54	16,90	84	20,28	122	23,66	166	27,04	216	30,42	274
3,39	11,49	39,0	6,78	14	10,17	31	13,56	54	16,95	85	20,34	122	23,73	166	27,12	217	30,51	275
3,40	11,56	39,3	6,80	14	10,20	31	13,60	54	17,00	85	20,40	122	23,80	167	27,20	218	30,60	275

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2\,y$	$4\,y$	$3\,y$	$9\,y$	$4\,y$	$16\,y$	$5\,y$	$25\,y$	$6\,y$	$36\,y$	$7\,y$	$49\,y$	$8\,y$	$64\,y$	$9\,y$	$81\,y$
3,40	11,56	39,3	6,80	14	10,20	31	13,60	54	17,00	85	20,40	122	23,80	167	27,20	218	30,60	275
3,41	11,63	39,7	6,82	14	10,23	31	13,64	55	17,05	85	20,46	123	23,87	167	27,28	218	30,69	276
3,42	11,70	40,0	6,84	14	10,26	31	13,68	55	17,10	86	20,52	123	23,94	168	27,36	219	30,78	277
3,43	11,76	40,4	6,86	14	10,29	31	13,72	55	17,15	86	20,58	123	24,01	168	27,44	220	30,87	278
3,44	11,83	40,7	6,88	14	10,32	31	13,76	55	17,20	86	20,64	124	24,08	169	27,52	220	30,96	279
3,45	11,90	41,1	6,90	14	10,35	31	13,80	55	17,25	86	20,70	124	24,15	169	27,60	221	31,05	279
3,46	11,97	41,4	6,92	14	10,38	31	13,84	55	17,30	86	20,76	125	24,22	170	27,68	221	31,14	280
3,47	12,04	41,8	6,94	14	10,41	31	13,88	56	17,35	87	20,82	125	24,29	170	27,76	222	31,23	281
3,48	12,11	42,1	6,96	14	10,44	31	13,92	56	17,40	87	20,88	125	24,36	171	27,84	223	31,32	282
3,49	12,18	42,5	6,98	14	10,47	31	13,96	56	17,45	87	20,94	126	24,43	171	27,92	223	31,41	283
3,50	12,25	42,9	7,00	14	10,50	32	14,00	56	17,50	88	21,00	126	24,50	172	28,00	224	31,50	284
3,51	12,32	43,2	7,02	14	10,53	32	14,04	56	17,55	88	21,06	126	24,57	172	28,08	225	31,59	284
3,52	12,39	43,6	7,04	14	10,56	32	14,08	56	17,60	88	21,12	127	24,64	172	28,16	225	31,68	285
3,53	12,46	44,0	7,06	14	10,59	32	14,12	56	17,65	88	21,18	127	24,71	173	28,24	226	31,77	286
3,54	12,53	44,4	7,08	14	10,62	32	14,16	57	17,70	88	21,24	127	24,78	173	28,32	227	31,86	287
3,55	12,60	44,7	7,10	14	10,65	32	14,20	57	17,75	89	21,30	128	24,85	174	28,40	227	31,95	288
3,56	12,67	45,1	7,12	14	10,68	32	14,24	57	17,80	89	21,36	128	24,92	174	28,48	228	32,04	288
3,57	12,74	45,5	7,14	14	10,71	32	14,28	57	17,85	89	21,42	128	24,99	175	28,56	228	32,13	289
3,58	12,82	45,9	7,16	14	10,74	32	14,32	57	17,90	90	21,48	129	25,06	175	28,64	229	32,22	290
3,59	12,89	46,3	7,18	14	10,77	32	14,36	57	17,95	90	21,54	129	25,13	176	28,72	230	32,31	291
3,60	12,96	46,7	7,20	14	10,80	32	14,40	58	18,00	90	21,60	130	25,20	176	28,80	230	32,40	292

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
3,60	12,96	46,7	7,20	14	10,80	32	14,40	58	18,00	90	21,60	130	25,20	176	28,80	230	32,40	292
3,61	13,03	47,0	7,22	14	10,83	32	14,44	58	18,05	90	21,66	130	25,27	177	28,88	231	32,49	292
3,62	13,10	47,4	7,24	14	10,86	33	14,48	58	18,10	90	21,72	130	25,34	177	28,96	232	32,58	293
3,63	13,18	47,8	7,26	15	10,89	33	14,52	58	18,15	91	21,78	131	25,41	178	29,04	232	32,67	294
3,64	13,25	48,2	7,28	15	10,92	33	14,56	58	18,20	91	21,84	131	25,48	178	29,12	233	32,76	295
3,65	13,32	48,6	7,30	15	10,95	33	14,60	58	18,25	91	21,90	131	25,55	179	29,20	234	32,85	296
3,66	13,40	49,0	7,32	15	10,98	33	14,64	59	18,30	92	21,96	132	25,62	179	29,28	234	32,94	296
3,67	13,47	49,4	7,34	15	11,01	33	14,68	59	18,35	92	22,02	132	25,69	180	29,36	235	33,03	297
3,68	13,54	49,8	7,36	15	11,04	33	14,72	59	18,40	92	22,08	132	25,76	180	29,44	236	33,12	298
3,69	13,62	50,2	7,38	15	11,07	33	14,76	59	18,45	92	22,14	133	25,83	181	29,52	236	33,21	299
3,70	13,69	50,7	7,40	15	11,10	33	14,80	59	18,50	92	22,20	133	25,90	181	29,60	237	33,30	300
3,71	13,76	51,1	7,42	15	11,13	33	14,84	59	18,55	93	22,26	134	25,97	182	29,68	237	33,39	301
3,72	13,84	51,5	7,44	15	11,16	33	14,88	60	18,60	93	22,32	134	26,04	182	29,76	238	33,48	301
3,73	13,91	51,9	7,46	15	11,19	34	14,92	60	18,65	93	22,38	134	26,11	183	29,84	239	33,57	302
3,74	13,99	52,3	7,48	15	11,22	34	14,96	60	18,70	94	22,44	135	26,18	183	29,92	239	33,66	303
3,75	14,06	52,7	7,50	15	11,25	34	15,00	60	18,75	94	22,50	135	26,25	184	30,00	240	33,75	304
3,76	14,14	53,2	7,52	15	11,28	34	15,04	60	18,80	94	22,56	135	26,32	184	30,08	241	33,84	305
3,77	14,21	53,6	7,54	15	11,31	34	15,08	60	18,85	94	22,62	136	26,39	185	30,16	241	33,93	305
3,78	14,28	54,0	7,56	15	11,34	34	15,12	60	18,90	94	22,68	136	26,46	185	30,24	242	34,02	306
3,79	14,36	54,4	7,58	15	11,37	34	15,16	61	18,95	95	22,74	136	26,53	186	30,32	243	34,11	307
3,80	14,44	54,9	7,60	15	11,40	34	15,20	61	19,00	95	22,80	137	26,60	186	30,40	243	34,20	308

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
3,80	14,44	54,9	7,60	15	11,40	34	15,20	61	19,00	95	22,80	137	26,60	186	30,40	243	34,20	308
3,81	14,52	55,3	7,62	15	11,43	34	15,24	61	19,05	95	22,86	137	26,67	187	30,48	244	34,29	309
3,82	14,59	55,7	7,64	15	11,46	34	15,28	61	19,10	96	22,92	138	26,74	187	30,56	244	34,38	309
3,83	14,67	56,2	7,66	15	11,49	34	15,32	61	19,15	96	22,98	138	26,81	188	30,64	245	34,47	310
3,84	14,75	56,6	7,68	15	11,52	35	15,36	61	19,20	96	23,04	138	26,88	188	30,72	246	34,56	311
3,85	14,82	57,1	7,70	15	11,55	35	15,40	62	19,25	96	23,10	139	26,95	189	30,80	246	34,65	312
3,86	14,90	57,5	7,72	15	11,58	35	15,44	62	19,30	96	23,16	139	27,02	189	30,88	247	34,74	313
3,87	14,98	58,0	7,74	15	11,61	35	15,48	62	19,35	97	23,22	139	27,09	190	30,96	248	34,83	313
3,88	15,05	58,4	7,76	16	11,64	35	15,52	62	19,40	97	23,28	140	27,16	190	31,04	248	34,92	314
3,89	15,13	58,9	7,78	16	11,67	35	15,56	62	19,45	97	23,34	140	27,23	191	31,12	249	35,01	315
3,90	15,21	59,3	7,80	16	11,70	35	15,60	62	19,50	98	23,40	140	27,30	191	31,20	250	35,10	316
3,91	15,29	59,8	7,82	16	11,73	35	15,64	63	19,55	98	23,46	141	27,37	192	31,28	250	35,19	317
3,92	15,37	60,2	7,84	16	11,76	35	15,68	63	19,60	98	23,52	141	27,44	192	31,36	251	35,28	318
3,93	15,44	60,7	7,86	16	11,79	35	15,72	63	19,65	98	23,58	141	27,51	193	31,44	252	35,37	318
3,94	15,52	61,2	7,88	16	11,82	35	15,76	63	19,70	98	23,64	142	27,58	193	31,52	252	35,46	319
3,95	15,60	61,6	7,90	16	11,85	36	15,80	63	19,75	99	23,70	142	27,65	194	31,60	253	35,55	320
3,96	15,68	62,1	7,92	16	11,88	36	15,84	63	19,80	99	23,76	143	27,72	194	31,68	253	35,64	321
3,97	15,76	62,6	7,94	16	11,91	36	15,88	64	19,85	99	23,82	143	27,79	194	31,76	254	35,73	322
3,98	15,84	63,0	7,96	16	11,94	36	15,92	64	19,90	100	23,88	143	27,86	195	31,84	255	35,82	322
3,99	15,92	63,5	7,98	16	11,97	36	15,96	64	19,95	100	23,94	144	27,93	196	31,92	255	35,91	323
4,00	16,00	64,0	8,00	16	12,00	36	16,00	64	20,00	100	24,00	144	28,00	196	32,00	256	36,00	324

	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
4,00	16.00	64,0	8,00	16	12,00	36	16,00	64	20,00	100	24,00	144	28,00	196	32,00	256	36,00	324
4,01	16,08	64,5	8,02	16	12,03	36	16,04	64	20,05	100	24,06	144	28,07	196	32,08	257	36,09	325
4,02	16,16	65,0	8,04	16	12,06	36	16,08	64	20,10	100	24,12	145	28,14	197	32,16	257	36,18	326
4,03	16,24	65,5	8,06	16	12,09	36	16,12	64	20,15	101	24,18	145	28,21	197	32,24	258	36,27	326
4,04	16,32	65,9	8,08	16	12,12	36	16,16	65	20,20	101	24,24	145	28,28	198	32,32	259	36,36	327
4,05	16,40	66,4	8,10	16	12,15	36	16,20	65	20,25	101	24,30	146	28,35	198	32,40	259	36,45	328
4,06	16,48	66,9	8,12	16	12,18	37	16,24	65	20,30	102	24,36	146	28,42	199	32,48	260	36,54	329
4,07	16,56	67,4	8,14	16	12,21	37	16,28	65	20,35	102	24,42	146	28,49	199	32,56	260	36,63	330
4,08	16,65	67,9	8,16	16	12,24	37	16,32	65	20,40	102	24,48	147	28,56	200	32,64	261	36,72	330
4,09	16,73	68,4	8,18	16	12,27	37	16,36	65	20,45	102	24,54	147	28,63	200	32,72	262	36,81	331
4,10	16,81	68,9	8,20	16	12,30	37	16,40	66	20,50	102	24,60	148	28,70	201	32,80	262	36,90	332
4,11	16,89	69,4	8,22	16	12,33	37	16,44	66	20,55	103	24,66	148	28,77	201	32,88	263	36,99	333
4,12	16,97	69,9	8,24	16	12,36	37	16,48	66	20,60	103	24,72	148	28,84	202	32,96	264	37,08	334
4,13	17,06	70,4	8,26	17	12,39	37	16,52	66	20,65	103	24,78	149	28,91	202	33,04	264	37,17	334
4,14	17,14	71,0	8,28	17	12,42	37	16,56	66	20,70	104	24,84	149	28,98	203	33,12	265	37,26	335
4,15	17,22	71,5	8,30	17	12,45	37	16,60	66	20,75	104	24,90	149	29,05	203	33,20	266	37,35	336
4,16	17,31	72,0	8,32	17	12,48	37	16,64	67	20,80	104	24,96	150	29,12	204	33,28	266	37,44	337
4,17	17,39	72,5	8,34	17	12,51	38	16,68	67	20,85	104	25,02	150	29,19	204	33,36	267	37,53	338
4,18	17,47	73,0	8,36	17	12,54	38	16,72	67	20,90	104	25,08	150	29,26	205	33,44	268	37,62	339
4,19	17,56	73,6	8,38	17	12,57	38	16,76	67	20,95	105	25,14	151	29,33	205	33,52	268	37,71	339
4,20	17,64	74,1	8,40	17	12,60	38	16,80	67	21,00	105	25,20	151	29,40	206	33,60	269	37,80	340

	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
4,20	17,64	74,1	8,40	17	12,60	38	16,80	67	21,00	105	25,20	151	29,40	206	33,60	269	37,80	340
4,21	17,72	74,6	8,42	17	12,63	38	16,84	67	21,05	105	25,26	152	29,47	206	33,68	269	37,89	341
4,22	17,81	75,2	8,44	17	12,66	38	16,88	68	21,10	106	25,32	152	29,54	207	33,76	270	37,98	342
4,23	17,89	75,7	8,46	17	12,69	38	16,92	68	21,15	106	25,38	152	29,61	207	33,84	271	38,07	343
4,24	17,98	76,2	8,48	17	12,72	38	16,96	68	21,20	106	25,44	153	29,68	208	33,92	271	38,16	343
4,25	18,06	76,8	8,50	17	12,75	38	17,00	68	21,25	106	25,50	153	29,75	208	34,00	272	38,25	344
4,26	18,15	77,3	8,52	17	12,78	38	17,04	68	21,30	106	25,56	153	29,82	209	34,08	273	38,34	345
4,27	18,23	77,9	8,54	17	12,81	38	17,08	68	21,35	107	25,62	154	29,89	209	34,16	273	38,43	346
4,28	18,32	78,4	8,56	17	12,84	39	17,12	68	21,40	107	25,68	154	29,96	210	34,24	274	38,52	347
4,29	18,40	79,0	8,58	17	12,87	39	17,16	69	21,45	107	25,74	154	30,03	210	34,32	275	38,61	347
4,30	18,49	79,5	8,60	17	12,90	39	17,20	69	21,50	108	25,80	155	30,10	211	34,40	275	38,70	348
4,31	18,58	80,1	8,62	17	12,93	39	17,24	69	21,55	108	25,86	155	30,17	211	34,48	276	38,79	349
4,32	18,66	80,6	8,64	17	12,96	39	17,28	69	21,60	108	25,92	156	30,24	212	34,56	276	38,88	350
4,33	18,75	81,2	8,66	17	12,99	39	17,32	69	21,65	108	25,98	156	30,31	212	34,64	277	38,97	351
4,34	18,84	81,7	8,68	17	13,02	39	17,36	69	21,70	108	26,04	156	30,38	213	34,72	278	39,06	352
4,35	18,92	82,3	8,70	17	13,05	39	17,40	70	21,75	109	26,10	157	30,45	213	34,80	278	39,15	352
4,36	19,01	82,9	8,72	17	13,08	39	17,44	70	21,80	109	26,16	157	30,52	214	34,88	279	39,24	353
4,37	19,10	83,5	8,74	17	13,11	39	17,48	70	21,85	109	26,22	157	30,59	214	34,96	280	39,33	354
4,38	19,18	84,0	8,76	18	13,14	39	17,52	70	21,90	110	26,28	158	30,66	215	35,04	280	39,42	355
4,39	19,27	84,6	8,78	18	13,17	40	17,56	70	21,95	110	26,34	158	30,73	215	35,12	281	39,51	356
4,40	19,36	85,2	8,80	18	13,20	40	17,60	70	22,00	110	26,40	158	30,80	216	35,20	282	39,60	356

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
4,40	19,36	85,2	8,80	18	13,20	40	17,60	70	22,00	110	26,40	158	30,80	216	35,20	282	39,60	356
4,41	19,45	85,8	8,82	18	13,23	40	17,64	71	22,05	110	26,46	159	30,87	216	35,28	282	39,69	357
4,42	19,54	86,4	8,84	18	13,26	40	17,68	71	22,10	110	26,52	159	30,94	217	35,36	283	39,78	358
4,43	19,62	86,9	8,86	18	13,29	40	17,72	71	22,15	111	26,58	159	31,01	217	35,44	284	39,87	359
4,44	19,71	87,5	8,88	18	13,32	40	17,76	71	22,20	111	26,64	160	31,08	218	35,52	284	39,96	360
4,45	19,80	88,1	8,90	18	13,35	40	17,80	71	22,25	111	26,70	160	31,15	218	35,60	285	40,05	360
4,46	19,89	88,7	8,92	18	13,38	40	17,84	71	22,30	112	26,76	161	31,22	219	35,68	285	40,14	361
4,47	19,98	89,3	8,94	18	13,41	40	17,88	72	22,35	112	26,82	161	31,29	219	35,76	286	40,23	362
4,48	20,07	89,9	8,96	18	13,44	40	17,92	72	22,40	112	26,88	161	31,36	220	35,84	287	40,32	363
4,49	20,16	90,5	8,98	18	13,47	40	17,96	72	22,45	112	26,94	162	31,43	220	35,92	287	40,41	364
4,50	20,25	91,1	9,00	18	13,50	40	18,00	72	22,50	112	27,00	162	31,50	220	36,00	288	40,50	364
4,51	20,34	91,7	9,02	18	13,53	41	18,04	72	22,55	113	27,06	162	31,57	221	36,08	289	40,59	365
4,52	20,43	92,3	9,04	18	13,56	41	18,08	72	22,60	113	27,12	163	31,64	221	36,16	289	40,68	366
4,53	20,52	93,0	9,06	18	13,59	41	18,12	72	22,65	113	27,18	163	31,71	222	36,24	290	40,77	367
4,54	20,61	93,6	9,08	18	13,62	41	18,16	73	22,70	114	27,24	163	31,78	222	36,32	291	40,86	368
4,55	20,70	94,2	9,10	18	13,65	41	18,20	73	22,75	114	27,30	164	31,85	223	36,40	291	40,95	369
4,56	20,79	94,8	9,12	18	13,68	41	18,24	73	22,80	114	27,36	164	31,92	223	36,48	292	41,04	369
4,57	20,88	95,4	9,14	18	13,71	41	18,28	73	22,85	114	27,42	164	31,99	224	36,56	292	41,13	370
4,58	20,98	96,1	9,16	18	13,74	41	18,32	73	22,90	114	27,48	165	32,06	224	36,64	293	41,22	371
4,59	21,07	96,7	9,18	18	13,77	41	18,36	73	22,95	115	27,54	165	32,13	225	36,72	294	41,31	372
4,60	21,16	97,3	9,20	18	13,80	41	18,40	74	23,00	115	27,60	166	32,20	225	36,80	294	41,40	373

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
4,60	21,16	97,3	9,20	18	13,80	41	18,40	74	23,00	115	27,60	166	32,20	225	36,80	294	41,40	373
4,61	21,25	98,0	9,22	18	13,83	41	18,44	74	23,05	115	27,66	166	32,27	226	36,88	295	41,49	373
4,62	21,34	98,6	9,24	18	13,86	42	18,48	74	23,10	116	27,72	166	32,34	226	36,96	296	41,58	374
4,63	21,44	99,3	9,26	19	13,89	42	18,52	74	23,15	116	27,78	167	32,41	227	37,04	296	41,67	375
4,64	21,53	99,9	9,28	19	13,92	42	18,56	74	23,20	116	27,84	167	32,48	227	37,12	297	41,76	376
4,65	21,62	100,5	9,30	19	13,95	42	18,60	74	23,25	116	27,90	167	32,55	228	37,20	298	41,85	377
4,66	21,72	101,2	9,32	19	13,98	42	18,64	75	23,30	116	27,96	168	32,62	228	37,28	298	41,94	377
4,67	21,81	101,8	9,34	19	14,01	42	18,68	75	23,35	117	28,02	168	32,69	229	37,36	299	42,03	378
4,68	21,90	102,5	9,36	19	14,04	42	18,72	75	23,40	117	28,08	168	32,76	229	37,44	300	42,12	379
4,69	22,00	103,2	9,38	19	14,07	42	18,76	75	23,45	117	28,14	169	32,83	230	37,52	300	42,21	380
4,70	22,09	103,8	9,40	19	14,10	42	18,80	75	23,50	118	28,20	169	32,90	230	37,60	301	42,30	381
4,71	22,18	104,5	9,42	19	14,13	42	18,84	75	23,55	118	28,26	170	32,97	231	37,68	301	42,39	382
4,72	22,28	105,2	9,44	19	14,16	42	18,88	76	23,60	118	28,32	170	33,04	231	37,76	302	42,48	382
4,73	22,37	105,8	9,46	19	14,19	43	18,92	76	23,65	118	28,38	170	33,11	232	37,84	303	42,57	383
4,74	22,47	106,5	9,48	19	14,22	43	18,96	76	23,70	118	28,44	171	33,18	232	37,92	303	42,66	384
4,75	22,56	107,2	9,50	19	14,25	43	19,00	76	23,75	119	28,50	171	33,25	233	38,00	304	42,75	385
4,76	22,66	107,9	9,52	19	14,28	43	19,04	76	23,80	119	28,56	171	33,32	233	38,08	305	42,84	386
4,77	22,75	108,5	9,54	19	14,31	43	19,08	76	23,85	119	28,62	172	33,39	234	38,16	305	42,93	386
4,78	22,85	109,2	9,56	19	14,34	43	19,12	76	23,90	120	28,68	172	33,46	234	38,24	306	43,02	387
4,79	22,94	109,9	9,58	19	14,37	43	19,16	77	23,95	120	28,74	172	33,53	235	38,32	307	43,11	388
4,80	23,04	110,6	9,60	19	14,40	43	19,20	77	24,00	120	28,80	173	33,60	235	38,40	307	47,20	389

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
4,80	23,04	110,6	9,60	19	14,40	43	19,20	77	24,00	120	28,80	173	33,60	235	38,40	307	43,20	389
4,81	23,14	111,3	9,62	19	14,43	43	19,24	77	24,05	120	28,86	173	33,67	236	38,48	308	43,29	390
4,82	23,23	112,0	9,64	19	14,46	43	19,28	77	24,10	120	28,92	174	33,74	236	38,56	308	43,38	300
4,83	23,33	112,7	9,66	19	14,49	43	19,32	77	24,15	121	28,98	174	33,81	237	38,64	309	43,47	391
4,84	23,43	113,4	9,68	19	14,52	44	19,36	77	24,20	121	29,04	174	33,88	237	38,72	310	43,56	392
4,85	23,52	114,1	9,70	19	14,55	44	19,40	78	24,25	121	29,10	175	33,95	238	38,80	310	43,65	393
4,86	23,62	114,8	9,72	19	14,58	44	19,44	78	24,30	122	29,16	175	34,02	233	38,88	311	43,74	394
4,87	23,72	115,5	9,74	19	14,61	44	19,48	78	24,35	122	29,22	175	34,09	239	38,96	312	43,83	394
4,88	23,81	116,2	9,76	20	14,64	44	19,52	78	24,40	122	29,28	176	34,16	239	39,04	312	43,92	395
4,89	23,91	116,9	9,78	20	14,67	44	19,56	78	24,45	122	29,34	176	34,23	240	39,12	313	44,01	396
4,90	24,01	117,6	9,80	20	14,70	44	19,60	78	24,50	122	29,40	176	34,30	240	39,20	314	44,10	397
4,91	24,11	118,4	9,82	20	14,73	44	19,64	79	24,55	123	29,46	177	34,37	241	39,28	314	44,19	308
4,92	24,21	119,1	9,84	20	14,76	44	19,68	79	24,60	123	29,52	177	34,44	241	39,36	315	44,28	398
4,93	24,30	119,8	9,86	20	14,79	44	19,72	79	24,65	123	29,58	177	34,51	242	39,44	316	44,37	399
4,94	24,40	120,6	9,88	20	14,82	44	19,76	79	24,70	124	29,64	178	34,58	242	39,52	316	44,46	400
4,95	24,50	121,3	9,90	20	14,85	45	19,80	79	24,75	124	29,70	178	34,65	243	39,60	317	44,55	401
4,96	24,60	122,0	9,92	20	14,88	45	19,84	79	24,80	124	29,76	179	34,72	243	39,68	317	44,64	402
4,97	24,70	122,8	9,94	20	14,91	45	19,88	80	24,85	124	29,82	179	34,79	244	39,76	318	44,73	403
4,98	24,80	123,5	9,96	20	14,94	45	19,92	80	24,90	124	29,88	179	34,86	244	39,84	319	44,82	403
4,99	24,90	124,3	9,98	20	14,97	45	19,96	80	24,95	125	29,94	180	34,93	245	39,92	319	44,91	404
5,00	25,00	125,0	10,00	20	15,00	45	20,00	80	25,00	125	30,00	180	35,00	245	40,00	320	45,00	405

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
5,00	25,00	125,0	10,00	20	15,00	45	20,00	80	25,00	125	30,00	180	35,00	245	40,00	320	45,00	405
5,01	25,10	125,8	10,02	20	15,03	45	20,04	80	25,05	125	30,06	180	35,07	245	40,08	321	45,09	406
5,02	25,20	126,5	10,04	20	15,06	45	20,08	80	25,10	126	30,12	181	35,14	246	40,16	321	45,18	407
5,03	25,30	127,3	10,06	20	15,09	45	20,12	80	25,15	126	30,18	181	35,21	246	40,24	322	45,27	407
5,04	25,40	128,0	10,08	20	15,12	45	20,16	81	25,20	126	30,24	181	35,28	247	40,32	323	45,36	408
5,05	25,50	128,8	10,10	20	15,15	45	20,20	81	25,25	126	30,30	182	35,35	247	40,40	323	45,45	409
5,06	25,60	129,6	10,12	20	15,18	46	20,24	81	25,30	126	30,36	182	35,42	248	40,48	324	45,54	410
5,07	25,70	130,3	10,14	20	15,21	46	20,28	81	25,35	127	30,42	182	35,49	248	40,56	324	45,63	411
5,08	25,81	131,1	10,16	20	15,24	46	20,32	81	25,40	127	30,48	183	35,56	249	40,64	325	45,72	411
5,09	25,91	131,9	10,18	20	15,27	46	20,36	81	25,45	127	30,54	183	35,63	249	40,72	326	45,81	412
5,10	26,01	132,7	10,20	20	15,30	46	20,40	82	25,50	128	30,60	184	35,70	250	40,80	326	45,90	413
5,11	26,11	133,4	10,22	20	15,33	46	20,44	82	25,55	128	30,66	184	35,77	250	40,88	327	45,99	414
5,12	26,21	134,2	10,24	20	15,36	46	20,48	82	25,60	128	30,72	184	35,84	251	40,96	328	46,08	415
5,13	26,32	135,0	10,26	21	15,39	46	20,52	82	25,65	128	30,78	185	35,91	251	41,04	328	46,17	416
5,14	26,42	135,8	10,28	21	15,42	46	20,56	82	25,70	128	30,84	185	35,98	252	41,12	329	46,26	416
5,15	26,52	136,6	10,30	21	15,45	46	20,60	82	25,75	129	30,90	185	36,05	252	41,20	330	46,35	417
5,16	26,63	137,4	10,32	21	15,48	46	20,64	83	25,80	129	30,96	186	36,12	253	41,28	330	46,44	418
5,17	26,73	138,2	10,34	21	15,51	47	20,68	83	25,85	129	31,02	186	36,19	253	41,36	331	46,53	419
5,18	26,83	139,0	10,36	21	15,54	47	20,72	83	25,90	130	31,08	186	36,26	254	41,44	332	46,62	420
5,19	26,94	139,8	10,38	21	15,57	47	20,76	83	25,95	130	31,14	187	36,33	254	41,52	332	46,71	420
5,20	27,04	140,6	10,40	21	15,60	47	20,80	83	26,00	130	31,20	187	36,40	255	41,60	333	46,80	421

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
5,20	27,04	140,6	10,40	21	15,60	47	20,80	83	26,00	130	31,20	187	36,40	255	44,60	333	46,80	421
5,21	27,14	141,4	10,42	21	15,63	47	20,84	83	26,05	130	31,26	188	36,47	255	41,68	333	46,89	422
5,22	27,25	142,2	10,44	21	15,66	47	20,88	84	26,10	130	31,32	188	36,54	256	41,76	334	46,98	423
5,23	27,35	143,1	10,46	21	15,69	47	20,92	84	26,15	131	31,38	188	36,61	256	41,84	335	47,07	424
5,24	27,46	143,9	10,48	21	15,72	47	20,96	84	26,20	131	31,44	189	36,68	257	41,92	335	47,16	424
5,25	27,56	144,7	10,50	21	15,75	47	21,00	84	26,25	131	31,50	189	36,75	257	42,00	336	47,25	425
5,26	27,67	145,5	10,52	21	15,78	47	21,04	84	26,30	132	31,56	189	36,82	258	42,08	337	47,34	426
5,27	27,77	146,4	10,54	21	15,81	47	21,08	84	26,35	132	31,62	190	36,89	258	42,16	337	47,43	427
5,28	27,88	147,2	10,56	21	15,84	48	21,12	84	26,40	132	31,63	190	36,96	259	42,24	338	47,52	428
5,29	27,98	148,0	10,58	21	15,87	48	21,16	85	26,45	132	31,74	190	37,03	259	42,32	339	47,61	428
5,30	28,09	148,9	10,60	21	15,90	48	21,20	85	26,50	132	31,80	191	37,10	260	42,40	339	47,70	429
5,31	28,20	149,7	10,62	21	15,93	48	21,24	85	26,55	133	31,86	191	37,17	260	42,48	340	47,79	430
5,32	28,30	150,6	10,64	21	15,96	48	21,28	85	26,60	133	31,92	192	37,24	261	42,56	340	47,88	431
5,33	28,41	151,4	10,66	21	15,99	48	21,32	85	26,65	133	31,98	192	37,31	261	42,64	341	47,97	432
5,34	28,52	152,3	10,68	21	16,02	48	21,36	85	26,70	134	32,04	192	37,38	262	42,72	342	48,06	433
5,35	28,62	153,1	10,70	21	16,05	48	21,40	86	26,75	134	32,10	193	37,45	262	42,80	342	48,15	433
5,36	28,73	154,0	10,72	21	16,08	48	21,44	86	26,80	134	32,16	193	37,52	263	42,88	343	48,24	434
5,37	28,84	154,9	10,74	21	16,11	48	21,48	86	26,85	134	32,22	193	37,59	263	42,96	344	48,33	435
5,38	28,94	155,7	10,76	22	16,14	48	21,52	86	26,90	134	32,28	194	37,66	264	43,04	344	48,42	436
5,39	29,05	156,6	10,78	22	16,17	49	21,56	86	26,95	135	32,34	194	37,73	264	43,12	345	48,51	437
5,40	29,16	157,5	10,80	22	16,20	49	21,60	86	27,00	135	32,40	194	37,80	265	43,20	346	48,60	437

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
5,40	29,16	157,5	10,80	22	16,20	49	21,60	86	27,00	135	32,40	194	37,80	265	43,20	346	48,60	437
5,41	29,27	158,3	10,82	22	16,23	49	21,64	87	27,05	135	32,46	195	37,87	265	43,28	346	48,69	438
5,42	29,38	159,2	10,84	22	16,26	49	21,68	87	27,10	136	32,52	195	37,94	266	43,36	347	48,78	439
5,43	29,48	160,1	10,86	22	16,29	49	21,72	87	27,15	136	32,58	195	38,01	266	43,44	348	48,87	440
5,44	29,59	161,0	10,88	22	16,32	49	21,76	87	27,20	136	32,64	196	38,08	267	43,52	348	48,96	441
5,45	29,70	161,9	10,90	22	16,35	49	21,80	87	27,25	136	32,70	196	38,15	267	43,60	349	49,05	441
5,46	29,81	162,8	10,92	22	16,38	49	21,84	87	27,30	136	32,76	197	38,22	268	43,68	349	49,14	442
5,47	29,92	163,7	10,94	22	16,41	49	21,88	88	27,35	137	32,82	197	38,29	268	43,76	350	49,23	443
5,48	30,03	164,6	10,96	22	16,44	49	21,92	88	27,40	137	32,88	197	38,36	269	43,84	351	49,32	444
5,49	30,14	165,5	10,98	22	16,47	49	21,96	88	27,45	137	32,94	198	38,43	269	43,92	351	49,41	445
5,50	30,25	166,4	11,00	22	16,50	50	22,00	88	27,50	138	33,00	198	38,50	270	44,00	352	49,50	446
5,51	30,36	167,3	11,02	22	16,53	50	22,04	88	27,55	138	33,06	198	38,57	270	44,08	353	49,59	446
5,52	30,47	168,2	11,04	22	16,56	50	22,08	88	27,60	138	33,12	199	38,64	270	44,16	353	49,68	447
5,53	30,58	169,1	11,06	22	16,59	50	22,12	88	27,65	138	33,18	199	38,71	271	44,24	354	49,77	448
5,54	30,69	170,0	11,08	22	16,62	50	22,16	88	27,70	138	33,24	199	38,78	271	44,32	355	49,86	449
5,55	30,80	171,0	11,10	22	16,65	50	22,20	89	27,75	139	33,30	200	38,85	272	44,40	355	49,95	450
5,56	30,91	171,9	11,12	22	16,68	50	22,24	89	27,80	139	33,36	200	38,92	272	44,48	355	50,04	450
5,57	31,02	172,8	11,14	22	16,71	50	22,28	89	27,85	139	33,42	200	38,99	273	44,56	356	50,13	451
5,58	31,14	173,7	11,16	22	16,74	50	22,32	89	27,90	140	33,48	201	39,06	273	44,64	357	50,22	452
5,59	31,25	174,7	11,18	22	16,77	50	22,36	89	27,95	140	33,54	201	39,13	274	44,72	358	50,31	453
5,60	31,36	175,6	11,20	22	16,80	50	22,40	90	28,00	140	33,60	202	39,20	274	44,80	358	50,40	454

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
5,60	31,36	175,6	11,20	22	16,80	50	22,40	90	28,00	140	33,60	202	39,20	274	44,80	358	50,40	454
5,61	31,47	176,6	11,22	22	16,83	50	22,44	90	28,05	140	33,66	202	39,27	275	44,88	359	50,49	454
5,62	31,58	177,5	11,24	22	16,86	51	22,48	90	28,10	140	33,72	202	39,34	275	44,96	360	50,58	455
5,63	31,70	178,4	11,26	23	16,89	51	22,52	90	28,15	141	33,78	203	39,41	276	45,04	360	50,67	456
5,64	31,81	179,4	11,28	23	16,92	51	22,56	90	28,20	141	33,84	203	39,48	276	45,12	361	50,76	457
5,65	31,92	180,4	11,30	23	16,95	51	22,60	90	28,25	141	33,90	203	39,55	277	45,20	362	50,85	458
5,66	32,04	181,3	11,32	23	16,98	51	22,64	91	28,30	142	33,96	204	39,62	277	45,28	362	50,94	458
5,67	32,15	182,3	11,34	23	17,01	51	22,68	91	28,35	142	34,02	204	39,69	278	45,36	363	51,03	459
5,68	32,26	183,3	11,36	23	17,04	51	22,72	91	28,40	142	34,08	204	39,76	278	45,44	364	51,12	460
5,69	32,38	184,2	11,38	23	17,07	51	22,76	91	28,45	142	34,14	205	39,83	279	45,52	364	51,21	461
5,70	32,49	185,2	11,40	23	17,10	51	22,80	91	28,50	142	34,20	205	39,90	279	45,60	365	51,30	462
5,71	32,60	186,2	11,42	23	17,13	51	22,84	91	28,55	143	34,26	206	39,97	280	45,68	365	51,39	462
5,72	32,72	187,1	11,44	23	17,16	51	22,88	92	28,60	143	34,32	206	40,04	280	45,76	366	51,48	463
5,73	32,83	188,1	11,46	23	17,19	52	22,92	92	28,65	143	34,38	206	40,11	281	45,84	367	51,57	464
5,74	32,95	189,1	11,48	23	17,22	52	22,96	92	28,70	144	34,44	207	40,18	281	45,92	367	51,66	465
5,75	33,06	190,1	11,50	23	17,25	52	23,00	92	28,75	144	34,50	207	40,25	282	46,00	368	51,75	466
5,76	33,18	191,1	11,52	23	17,28	52	23,04	92	28,80	144	34,56	207	40,32	282	46,08	369	51,84	467
5,77	33,29	192,1	11,54	23	17,31	52	23,08	92	28,85	144	34,62	208	40,39	283	46,16	369	51,93	467
5,78	33,41	193,1	11,56	23	17,34	52	23,12	92	28,90	144	34,68	208	40,46	283	46,24	370	52,02	468
5,79	33,52	194,1	11,58	23	17,37	52	23,16	93	28,95	145	34,74	208	40,53	284	46,32	371	52,11	469
5,80	33,64	195,1	11,60	23	17,40	52	23,20	93	29,00	145	34,80	209	40,60	284	46,40	371	52,20	470

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
5,80	33,54	195,1	11,60	23	17,40	52	23,20	93	29,00	145	34,80	209	40,60	284	46,40	371	52,20	470
5,81	33,76	196,1	11,62	23	17,43	52	23,24	93	29,05	145	34,86	209	40,67	285	46,48	372	52,29	471
5,82	33,87	197,1	11,64	23	17,46	52	23,28	93	29,10	146	34,92	210	40,74	285	46,56	372	52,38	471
5,83	33,99	198,2	11,66	23	17,49	52	23,32	93	29,15	146	34,98	210	40,81	286	46,64	373	52,47	472
5,84	34,11	199,2	11,68	23	17,52	53	23,36	93	29,20	146	35,04	210	40,88	286	46,72	374	52,56	473
5,85	34,22	200,2	11,70	23	17,55	53	23,40	94	29,25	146	35,10	211	40,95	287	46,80	374	52,65	474
5,86	34,34	201,2	11,72	23	17,58	53	23,44	94	29,30	146	35,16	211	41,02	287	46,88	375	52,74	475
5,87	34,46	202,3	11,74	23	17,61	53	23,48	94	29,35	147	35,22	211	41,09	288	46,96	376	52,83	475
5,88	34,57	203,3	11,76	24	17,64	53	23,52	94	29,40	147	35,28	212	41,16	288	47,04	376	52,92	476
5,89	34 69	204,3	11,78	24	17,67	53	23,56	94	29,45	147	35,34	212	41,23	289	47,12	377	53,01	477
5,90	34,81	205,4	11,80	24	17,70	53	23,60	94	29,50	148	35,40	212	41,30	289	47,20	378	53,10	478
5,91	34,93	206,4	11,82	24	17,73	53	23,64	95	29,55	148	35,46	213	41,37	290	47,28	378	53,19	479
5,92	35,05	207,5	11,84	24	17,76	53	23,68	95	29,60	148	35,52	213	41,44	290	47,36	379	53,28	480
5,93	35,16	208,5	11,86	24	17,79	53	23,72	95	29,65	148	35,58	213	41,51	291	47,44	380	53,37	480
5,94	35,28	209,6	11,88	24	17,82	53	23,76	95	29,70	148	35,64	214	41,58	291	47,52	380	53,46	481
5,95	35,40	210,6	11,90	24	17,85	54	23,80	95	29,75	149	35,70	214	41,65	292	47,60	381	53,55	482
5,96	35,52	211,7	11,92	24	17,88	54	23,84	95	29,80	149	35,76	215	41,72	292	47,68	381	53,64	483
5,97	35,64	212,8	11,94	24	17,91	54	23,88	96	29,85	149	35,82	215	41,79	293	47,76	382	53,73	484
5,98	35,76	213,8	11,96	24	17,94	54	23,92	96	29,90	150	35,88	215	41,86	293	47,84	383	53,82	484
5,99	35,88	214,9	11,98	24	17,97	54	23,96	96	29,95	150	35,94	216	41,93	294	47,92	383	53,91	485
6,00	36,00	216,0	12,00	24	18,00	54	24,00	96	30,00	150	36,00	216	42,00	294	48,00	384	54,00	486

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
6,00	36,00	216	12,00	24	18,00	54	24,00	96	30,00	150	36,00	216	42,00	294	48,00	384	54,00	486
6,01	36,12	217	12,02	24	18,03	54	24,04	96	30,05	150	36,06	216	42,07	294	48,08	385	54,09	487
6,02	36,24	218	12,04	24	18,06	54	24,08	96	30,10	150	36,12	217	42,14	295	48,16	385	54,18	488
6,03	36,36	219	12,06	24	18,09	54	24,12	96	30,15	151	36,18	217	42,21	295	48,24	386	54,27	488
6,04	36,48	220	12,08	24	18,12	54	24,16	97	30,20	151	36,24	217	42,28	296	48,32	387	54,36	489
6,05	36,60	221	12,10	24	18,15	54	24,20	97	30,25	151	36,30	218	42,35	296	48,40	387	54,45	490
6,06	36,72	223	12,12	24	18,18	55	24,24	97	30,30	152	36,36	218	42,42	297	48,48	388	51,54	491
6,07	36,84	224	12,14	24	18,21	55	24,28	97	30,35	152	36,42	218	42,49	297	48,56	388	54,63	492
6,08	36,97	225	12,16	24	18,24	55	24,32	97	30,40	152	36,48	219	42,56	298	48,64	389	54,72	492
6,09	37,09	226	12,18	24	18,27	55	24,36	97	30,45	152	36,54	219	42,63	298	48,72	390	54,81	493
6,10	37,21	227	12,20	24	18,30	55	24,40	98	30,50	152	36,60	220	42,70	299	48,80	390	54,90	494
6,11	37,33	228	12,22	24	18,33	55	24,44	98	30,55	153	36,66	220	42,77	299	48,88	391	54,99	495
6,12	37,45	229	12,24	24	18,36	55	24,48	98	30,60	153	36,72	220	42,84	300	43,96	392	55,08	496
6,13	37,58	230	12,26	25	18,39	55	24,52	98	30,65	153	36,78	221	42,91	300	49,04	392	55,17	496
6,14	37,70	231	12,28	25	18,42	55	24,56	98	30,70	154	36,84	221	42,98	301	49,12	393	55,26	497
6,15	37,82	233	12,30	25	18,45	55	24,60	98	30,75	154	36,90	221	43,05	301	49,20	394	55,35	498
6,16	37,95	234	12,32	25	18,48	55	24,64	99	30,80	154	33,96	222	43,12	302	49,28	394	55,44	499
6,17	38,07	235	12,34	25	18,51	56	24,68	99	30,85	154	37,02	222	43,19	302	49,36	395	55,53	500
6,18	38,19	236	12,36	25	18,54	56	24,72	99	30,90	154	37,08	222	43,26	303	49,44	396	55,62	501
6,19	38,32	237	12,38	25	18,57	56	24,76	99	30,95	155	37,14	223	43,33	303	49,52	396	55,71	501
6,20	38,44	238	12,40	25	18,60	56	24,80	99	31,00	155	37,20	223	43,40	304	49,60	397	55,80	502

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
6,20	38,44	238	12,40	25	18,60	56	24,80	99	31,00	155	37,20	223	43,40	304	49,60	397	55,80	502
6,21	38,56	239	12,42	25	18,63	56	24,84	99	31,05	155	37,26	224	43,47	304	49,68	397	55,89	503
6,22	38,69	241	12,44	25	18,66	56	24,88	100	31,10	156	37,32	224	43,54	305	49,76	398	55,98	504
6,23	38,81	242	12,46	25	18,69	56	24,92	100	31,15	156	37,38	224	43,61	305	49,84	399	56,07	505
6,24	38,94	243	12,48	25	18,72	56	24,96	100	31,20	156	37,44	225	43,68	306	49,92	399	56,16	505
6,25	39,06	244	12,50	25	18,75	56	25,00	100	31,25	156	37,50	225	43,75	306	50,00	400	56,25	506
6,26	39,19	245	12,52	25	18,78	56	25,04	100	31,30	156	37,56	225	43,82	307	50,08	401	56,34	507
6,27	39,31	246	12,54	25	18,81	56	25,08	100	31,35	157	37,62	226	43,89	307	50,16	401	56,43	508
6,28	39,44	248	12,56	25	18,84	57	25,12	100	31,40	157	37,68	226	43,96	308	50,24	402	56,52	509
6,29	39,56	249	12,58	25	18,87	57	25,16	101	31,45	157	37,74	226	44,03	308	50,32	403	56,61	509
6,30	39,69	250	12,60	25	18,90	57	25,20	101	31,50	158	37,80	227	44,10	309	50,40	403	56,70	510
6,31	39,82	251	12,62	25	18,93	57	25,24	101	31,55	158	37,86	227	44,17	309	50,48	404	56,79	511
6,32	39,94	252	12,64	25	18,96	57	25,28	101	31,60	158	37,92	228	44,24	310	50,56	404	56,88	512
6,33	40,07	254	12,66	25	18,99	57	25,32	101	31,65	158	37,98	228	44,31	310	50,64	405	56,97	513
6,34	40,20	255	12,68	25	19,02	57	25,36	101	31,70	158	38,04	228	44,38	311	50,72	406	57,06	514
6,35	40,32	256	12,70	25	19,05	57	25,40	102	31,75	159	38,10	229	44,45	311	50,80	406	57,15	514
6,36	40,45	257	12,72	25	19,08	57	25,44	102	31,80	159	38,16	229	44,52	312	50,88	407	57,24	515
6,37	40,58	258	12,74	25	19,11	57	25,48	102	31,85	159	38,22	229	44,59	312	50,96	408	57,33	516
6,38	40,70	260	12,76	26	19,14	57	25,52	102	31,90	160	38,28	230	44,66	313	51,04	408	57,42	517
6,39	40,83	261	12,78	26	19,17	58	25,56	102	31,95	160	38,34	230	44,73	313	51,12	409	57,51	518
6,40	40,96	262	12,80	26	19,20	58	25,60	102	32,00	160	38,40	230	44,80	314	51,20	410	57,60	518

35 Зак. 5391. С. Н. Благовещенский.

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
6,40	40,96	262	12,80	26	19,20	58	25,60	102	32,00	160	38,40	230	44,80	314	51,20	410	57,60	518
6,41	41,09	263	12,82	26	19,23	58	25,64	103	32,05	160	38,46	231	44,87	314	51,28	410	57,69	519
6,42	41,22	265	12,84	26	19,26	58	25,68	103	32,10	160	38,52	231	44,94	315	51,36	411	57,78	520
6,43	41,34	266	12,86	26	19,29	58	25,72	103	32,15	161	38,58	231	45,01	315	51,44	412	57,87	521
6,44	41,47	267	12,88	26	19,32	58	25,76	103	32,20	161	38,64	232	45,08	316	51,52	412	57,96	522
6,45	41,60	268	12,90	26	19,35	58	25,80	103	32,25	161	38,70	232	45,15	316	51,60	413	58,05	522
6,46	41,73	270	12,92	26	19,38	58	25,84	103	32,30	162	38,76	233	45,22	317	51,68	413	58,14	523
6,47	41,86	271	12,94	26	19,41	58	25,88	104	32,35	162	38,82	233	45,29	317	51,76	414	58,23	524
6,48	41,99	272	12,96	26	19,44	58	25,92	104	32,40	162	38,88	233	45,36	318	51,84	415	58,32	525
6,49	42,12	273	12,98	26	19,47	58	25,96	104	32,45	162	38,94	234	45,43	318	51,92	415	58,41	526
6,50	42,25	275	13,00	26	19,50	58	26,00	104	32,50	162	39,00	234	45,50	318	52,00	416	58,50	526
6,51	42,38	276	13,02	26	19,53	59	26,04	104	32,55	163	39,06	234	45,57	319	52,08	417	58,59	527
6,52	42,51	277	13,04	26	19,56	59	26,08	104	32,60	163	39,12	235	45,64	319	52,16	417	58,68	528
6,53	42,64	278	13,06	26	19,59	59	26,12	104	32,65	163	39,18	235	45,71	320	52,24	418	58,77	529
6,54	42,77	280	13,08	26	19,62	59	26,16	105	32,70	164	39,24	235	45,78	320	52,32	419	58,86	530
6,55	42,90	281	13,10	26	19,65	59	26,20	105	32,75	164	39,30	236	45,85	321	52,40	419	58,95	531
6,56	43,03	282	13,12	26	19,68	59	26,24	105	32,80	164	39,36	236	45,92	321	52,48	420	59,04	531
6,57	43,16	284	13,14	26	19,71	59	26,28	105	32,85	164	39,42	236	45,99	322	52,56	420	59,13	532
6,58	43,30	285	13,16	26	19,74	59	26,32	105	32,90	164	39,48	237	46,06	322	52,64	421	59,22	533
6,59	43,43	286	13,18	26	19,77	59	26,36	105	32,95	165	39,54	237	46,13	323	52,72	422	59,31	534
6,60	43,56	287	13,20	26	19,80	59	26,40	106	33,00	165	39,60	238	46,20	323	52,80	422	59,40	535

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
6,60	43,56	287	13,20	26	19,80	59	26,40	106	33,00	165	39,60	238	46,20	323	52,80	422	59,40	535
6,61	43,69	289	13,22	26	19,83	59	26,44	106	33,05	165	39,66	238	46,27	324	52,88	423	59,49	535
6,62	43,82	290	13,24	26	19,86	60	26,48	106	33,10	166	39,72	238	46,34	324	52,96	424	59,58	536
6,63	43,96	291	13,26	27	19,89	60	26,52	106	33,15	166	39,78	239	46,41	325	53,04	424	59,67	537
6,64	44,09	293	13,28	27	19,92	60	26,56	106	33,20	166	39,84	239	46,48	325	53,12	425	59,76	538
6,65	44,22	294	13,30	27	19,95	60	26,60	106	33,25	166	39,90	239	46,55	326	53,20	426	59,85	539
6,66	44,36	295	13,32	27	19,98	60	26,64	107	33,30	166	39,96	240	46,62	326	53,28	426	59,94	539
6,67	44,49	297	13,34	27	20,01	60	26,68	107	33,35	167	40,02	240	46,69	327	53,36	427	60,03	540
6,68	44,62	298	13,36	27	20,04	60	26,72	107	33,40	167	40,08	240	46,76	327	53,44	428	60,12	541
6,69	44,76	299	13,38	27	20,07	60	26,76	107	33,45	167	40,14	241	46,83	328	53,52	428	60,21	542
6,70	44,89	301	13,40	27	20,10	60	26,80	107	33,50	168	40,20	241	46,90	328	53,60	429	60,30	543
6,71	45,02	302	13,42	27	20,13	60	26,84	107	33,55	168	40,26	242	46,97	329	53,68	429	60,39	544
6,72	45,16	303	13,44	27	20,16	60	26,88	108	33,60	168	40,32	242	47,04	329	53,76	430	60,48	544
6,73	45,29	305	13,46	27	20,19	61	26,92	108	33,65	168	40,38	242	47,11	330	53,84	431	60,57	545
6,74	45,43	306	13,48	27	20,22	61	26,96	108	33,70	168	40,44	243	47,18	330	53,92	431	60,66	546
6,75	45,56	308	13,50	27	20,25	61	27,00	108	33,75	169	40,50	243	47,25	331	54,00	432	60,75	547
6,76	45,70	309	13,52	27	20,28	61	27,04	108	33,80	169	40,56	243	47,32	331	54,08	433	60,84	548
6,77	45,83	310	13,54	27	20,31	61	27,08	108	33,85	169	40,62	244	47,39	332	54,16	433	60,93	548
6,78	45,97	312	13,56	27	20,34	61	27,12	108	33,90	170	40,68	244	47,46	332	54,24	434	61,02	549
6,79	46,10	313	13,58	27	20,37	61	27,16	109	33,95	170	40,74	244	47,53	333	54,32	435	61,11	550
6,80	46,24	314	13,60	27	20,40	61	27,20	109	34,00	170	40,80	245	47,60	333	54,40	435	61,20	551

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
6,80	46,24	314	13,60	27	20,40	61	27,20	109	34,00	170	40,80	245	47,60	333	54,40	435	61,20	551
6,81	46,38	316	13,62	27	20,43	61	27,24	109	34,05	170	40,86	245	47,67	334	54,48	436	61,29	552
6,82	46,51	317	13,64	27	20,46	61	27,28	109	34,10	170	40,92	246	47,74	334	54,56	436	61,38	552
6,83	46,65	319	13,66	27	20,49	61	27,32	109	34,15	171	40,98	246	47,81	335	54,64	437	61,47	553
6,84	46,79	320	13,68	27	20,52	62	27,36	109	34,20	171	41,04	246	47,88	335	54,72	438	61,56	554
6,85	46,92	321	13,70	27	20,55	62	27,40	110	34,25	171	41,10	247	47,95	336	54,80	438	61,65	555
6,86	47,06	323	13,72	27	20,58	62	27,44	110	34,30	172	41,16	247	48,02	336	54,88	439	61,74	556
6,87	47,20	324	13,74	27	20,61	62	27,48	110	34,35	172	41,22	247	48,09	337	54,96	440	61,83	556
6,88	47,33	326	13,76	28	20,64	62	27,52	110	34,40	172	41,28	248	48,16	337	55,04	440	61,92	557
6,89	47,47	327	13,78	28	20,67	62	27,56	110	34,45	172	41,34	248	48,23	338	55,12	441	62,01	558
6,90	47,61	329	13,80	28	20,70	62	27,60	110	34,50	172	41,40	248	48,30	338	55,20	442	62,10	559
6,91	47,75	330	13,82	28	20,73	62	27,64	111	34,55	173	41,46	249	48,37	339	55,28	442	62,19	560
6,92	47,89	331	13,84	28	20,76	62	27,68	111	34,60	173	41,52	249	48,44	339	55,36	443	62,28	560
6,93	48,02	333	13,86	28	20,79	62	27,72	111	34,65	173	41,58	249	48,51	340	55,44	444	62,37	561
6,94	48,16	334	13,88	28	20,82	62	27,76	111	34,70	174	41,64	250	48,58	340	55,52	444	62,46	561
6,95	48,30	336	13,90	28	20,85	63	27,80	111	34,75	174	41,70	250	48,65	341	55,60	445	62,55	563
6,96	48,44	337	13,92	28	20,88	63	27,84	111	34,80	174	41,76	251	48,72	341	55,68	445	62,64	564
6,97	48,58	339	13,94	28	20,91	63	27,88	112	34,85	174	41,82	251	48,79	342	55,76	446	62,73	565
6,98	48,72	340	13,96	28	20,94	63	27,92	112	34,90	174	41,88	251	48,86	342	55,84	447	62,82	565
6,99	48,86	342	13,98	28	20,97	63	27,96	112	34,95	175	41,94	252	48,93	343	55,92	447	62,91	566
7,00	49,00	343	14,00	28	21,00	63	28,00	112	35,00	175	42,00	252	49,00	343	56,00	448	63,00	567

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
v	v^2	v^3	$2v$	$4v$	$3v$	$9v$	$4v$	$16v$	$5v$	$25v$	$6v$	$36v$	$7v$	$49v$	$8v$	$64v$	$9v$	$81v$
7,00	49,00	343	14,00	28	21,00	63	28,00	112	35,00	175	42,00	252	49,00	343	56,00	448	63,00	567
7,01	49,14	344	14,02	28	21,03	63	28,04	112	35,05	175	42,06	252	49,07	343	56,08	449	63,09	568
7,02	49,28	346	14,04	28	21,06	63	28,08	112	35,10	176	42,12	253	49,14	344	56,16	449	63,18	569
7,03	49,42	347	14,06	28	21,09	63	28,12	112	35,15	176	42,18	253	49,21	344	56,24	450	63,27	569
7,04	49,56	349	14,08	28	21,12	63	28,16	113	35,20	176	42,24	253	49,28	345	56,32	451	63,36	570
7,05	49,70	350	14,10	28	21,15	63	28,20	113	35,25	176	42,30	251	49,35	345	56,40	451	63,45	571
7,06	49,84	352	14,12	28	21,18	64	28,24	113	35,30	176	42,36	254	49,42	346	56,48	452	63,54	572
7,07	49,98	353	14,14	28	21,21	64	28,28	113	35,35	177	42,42	254	49,49	346	56,56	452	63,63	573
7,08	50,13	355	14,16	28	21,24	64	28,32	113	35,40	177	42,48	255	49,56	347	56,64	453	63,72	573
7,09	50,27	356	14,18	28	21,27	64	28,36	113	35,45	177	42,54	255	49,63	347	56,72	454	63,81	574
7,10	50,41	358	14,20	28	21,30	64	28,40	114	35,50	178	42,60	256	49,70	348	56,80	454	63,90	575
7,11	50,55	359	14,22	28	21,33	64	28,44	114	35,55	178	42,66	256	49,77	348	56,88	455	63,99	576
7,12	50,69	361	14,24	28	21,36	64	28,48	114	35,60	178	42,72	256	49,84	349	56,96	456	64,08	577
7,13	50,84	362	14,26	29	21,39	64	28,52	114	35,65	178	42,78	257	49,91	349	57,04	456	64,17	578
7,14	50,98	364	14,28	29	21,42	64	28,56	114	35,70	178	42,84	257	49,98	350	57,12	457	64,26	578
7,15	51,12	366	14,30	29	21,45	64	28,60	114	35,75	179	42,90	257	50,05	350	57,20	458	64,35	579
7,16	51,27	367	14,32	29	21,48	64	28,64	115	35,80	179	42,96	258	50,12	351	57,28	458	64,44	580
7,17	51,41	369	14,31	29	21,51	65	28,68	115	35,85	179	43,02	258	50,19	351	57,36	459	64,53	581
7,18	51,55	370	14,36	29	21,54	65	28,72	115	35,90	180	43,08	258	50,26	352	57,44	460	64,62	582
7,19	51,70	372	14,38	29	21,57	65	28,76	115	35,95	180	43,14	259	50,33	352	57,52	460	64,71	582
7,20	51,84	373	14,40	29	21,60	65	28,80	115	36,00	180	43,20	259	50,40	353	57,60	461	64,80	583

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
7,20	51,84	373	14,40	29	21,60	65	28,80	115	36,00	180	43,20	259	50,40	353	57,60	461	64,80	583
7,21	51,98	375	14,42	29	21,63	65	28,84	115	36,05	180	43,26	260	50,47	353	57,68	461	64,89	584
7,22	52,13	376	14,44	29	21,66	65	28,88	116	36,10	180	43,32	260	50,54	354	57,76	462	64,98	585
7,23	52,27	378	14,46	29	21,69	65	28,92	116	36,15	181	43,38	260	50,61	354	57,84	463	65,07	586
7,24	52,42	380	14,48	29	21,72	65	28,96	116	36,20	181	43,14	261	50,68	355	57,92	463	65,16	586
7,25	52,56	381	14,50	29	21,75	65	29,00	116	36,25	181	43,50	261	50,75	355	58,00	464	65,25	587
7,26	52,71	383	14,52	29	21,78	65	29,04	116	36,30	182	43,56	261	50,82	356	58,08	465	65,34	588
7,27	52,85	384	14,54	29	21,81	65	29,08	116	36,35	182	43,62	262	50,89	356	58,16	465	65,43	589
7,28	53,00	386	14,56	29	21,84	66	29,12	116	36,40	182	43,68	262	50,96	357	58,24	466	65,52	590
7,29	53,14	387	14,58	29	21,87	66	29,16	117	36,45	182	43,74	262	51,03	357	58,32	467	65,61	590
7,30	53,29	389	14,60	29	21,90	66	29,20	117	36,50	182	43,80	263	51,10	358	58,40	467	65,70	591
7,31	53,44	391	14,62	29	21,93	66	29,24	117	36,55	183	43,86	263	51,17	358	58,48	468	65,79	592
7,32	53,58	392	14,64	29	21,96	66	29,28	117	36,60	183	43,92	264	51,24	359	58,56	468	65,88	593
7,33	53,73	394	14,66	29	21,99	66	29,32	117	36,65	183	43,98	261	51,31	359	58,64	469	65,97	594
7,34	53,88	395	14,68	29	22,02	66	29,36	117	36,70	184	44,04	264	51,38	360	58,72	470	66,06	594
7,35	54,02	397	14,70	29	22,05	66	29,40	118	36,75	184	44,10	265	51,45	360	58,80	470	66,15	595
7,36	54,17	399	14,72	29	22,08	66	29,44	118	36,80	184	44,16	265	51,52	361	58,88	471	66,24	596
7,37	54,32	400	14,74	29	22,11	66	29,48	118	36,85	184	44,22	265	51,59	361	58,96	472	66,33	597
7,38	54,46	402	14,76	30	22,14	66	29,52	118	36,90	184	44,28	266	51,66	362	59,04	472	66,42	598
7,39	54,61	404	14,78	30	22,17	67	29,56	118	36,95	185	44,34	266	51,73	362	59,12	473	66,51	599
7,40	54,76	405	14,80	30	22,20	67	29,60	118	37,00	185	44,40	266	51,80	363	59,20	474	66,60	599

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
7,40	54,76	405	14,80	30	22,20	67	29,60	118	37,00	185	44,40	266	51,80	363	59,20	474	66,60	599
7,41	54,91	407	14,82	30	22,23	67	29,64	119	37,05	185	44,46	267	51,87	363	59,28	474	66,69	600
7,42	55,06	409	14,84	30	22,26	67	29,68	119	37,10	186	44,52	267	51,94	364	59,36	475	66,78	601
7,43	55,20	410	14,86	30	22,29	67	29,72	119	37,15	186	44,58	267	52,01	364	59,44	476	66,87	602
7,44	55,35	412	14,88	30	22,32	67	29,76	119	37,20	186	44,64	268	52,08	365	59,52	476	66,96	603
7,45	55,50	413	14,90	30	22,35	67	29,80	119	37,25	186	44,70	268	52,15	365	59,60	477	67,05	603
7,46	55,65	415	14,92	30	22,38	67	29,84	119	37,30	186	44,76	269	52,22	366	59,68	477	67,14	604
7,47	55,80	417	14,94	30	22,41	67	29,88	120	37,35	187	44,82	269	52,29	366	59,76	478	67,23	605
7,48	55,95	419	14,96	30	22,44	67	29,92	120	37,40	187	44,88	269	52,36	367	59,84	479	67,32	606
7,49	56,10	420	14,98	30	22,47	67	29,96	120	37,45	187	44,94	270	52,43	367	59,92	479	67,41	607
7,50	56,25	422	15,00	30	22,50	68	30,00	120	37,50	188	45,00	270	52,50	368	60,00	480	67,50	608
7,51	56,40	424	15,02	30	22,53	68	30,04	120	37,55	188	45,06	270	52,57	368	60,08	481	67,59	608
7,52	56,55	425	15,04	30	22,56	68	30,08	120	37,60	188	45,12	271	52,64	368	60,16	481	67,68	609
7,53	56,70	427	15,06	30	22,59	68	30,12	120	37,65	188	45,18	271	52,71	369	60,24	482	67,77	610
7,54	56,85	429	15,08	30	22,62	68	30,16	121	37,70	188	45,24	271	52,78	369	60,32	483	67,86	611
7,55	57,00	430	15,10	30	22,65	68	30,20	121	37,75	189	45,30	272	52,85	370	60,40	483	67,95	612
7,56	57,15	432	15,12	30	22,68	68	30,24	121	37,80	189	45,36	272	52,92	370	60,48	484	68,04	612
7,57	57,30	434	15,14	30	22,71	68	30,28	121	37,85	189	45,42	272	52,99	371	60,56	484	68,13	613
7,58	57,46	436	15,16	30	22,74	68	30,32	121	37,90	190	45,48	273	53,06	371	60,64	485	68,22	614
7,59	57,61	437	15,18	30	22,77	68	30,36	121	37,95	190	45,54	273	53,13	372	60,72	486	68,31	615
7,60	57,76	439	15,20	30	22,80	68	30,40	122	38,00	190	45,60	274	53,20	372	60,80	486	68,40	616

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
7,60	57,76	439	15,20	30	22,80	68	30,40	122	38,00	190	45,60	274	53,20	372	60,80	486	68,40	616
7,61	57,91	441	15,22	30	22,83	68	30,44	122	38,05	190	45,66	274	53,27	373	60,88	487	68,49	616
7,62	58,06	442	15,24	30	22,86	69	30,48	122	38,10	190	45,72	274	53,34	373	60,96	488	68,58	617
7,63	58,22	444	15,26	31	22,89	69	30,52	122	38,15	191	45,78	275	53,41	374	61,04	488	68,67	618
7,64	58,37	446	15,28	31	22,92	69	30,56	122	38,20	191	45,84	275	53,48	374	61,12	489	68,76	619
7,65	58,52	448	15,30	31	22,95	69	30,60	122	38,25	191	45,90	275	53,55	375	61,20	490	68,85	620
7,66	58,68	449	15,32	31	22,98	69	30,64	123	38,30	192	45,96	276	53,62	375	61,28	490	68,94	620
7,67	58,83	451	15,34	31	23,01	69	30,68	123	38,35	192	46,02	276	53,69	376	61,36	491	69,03	621
7,68	58,98	453	15,36	31	23,04	69	30,72	123	38,40	192	46,08	276	53,76	376	61,44	492	69,12	622
7,69	59,14	455	15,38	31	23,07	69	30,76	123	38,45	192	46,14	277	53,83	377	61,52	492	69,21	623
7,70	59,29	457	15,40	31	23,10	69	30,80	123	38,50	192	46,20	277	53,90	377	61,60	493	69,30	624
7,71	59,44	458	15,42	31	23,13	69	30,84	123	38,55	193	46,26	278	53,97	378	61,68	493	69,39	625
7,72	59,60	460	15,44	31	23,16	69	30,88	124	38,60	193	46,32	278	54,04	378	61,76	494	69,48	625
7,73	59,75	462	15,46	31	23,19	70	30,92	124	38,65	193	46,38	278	54,11	379	61,84	495	69,57	626
7,74	59,91	464	15,48	31	23,22	70	30,96	124	38,70	194	46,44	279	54,18	379	61,92	495	69,66	627
7,75	60,06	465	15,50	31	23,25	70	31,00	124	38,75	194	46,50	279	54,25	380	62,00	496	69,75	628
7,76	60,22	467	15,52	31	23,28	70	31,04	124	38,80	194	46,56	279	54,32	380	62,08	497	69,84	629
7,77	60,37	469	15,54	31	23,31	70	31,08	124	38,85	194	46,62	280	54,39	381	62,16	497	69,93	629
7,78	60,53	471	15,56	31	23,34	70	31,12	124	38,90	194	46,68	280	54,46	381	62,24	498	70,02	630
7,79	60,68	473	15,58	31	23,37	70	31,16	125	38,95	195	46,74	280	54,53	382	62,32	499	70,11	631
7,80	60,84	475	15,60	31	23,40	70	31,20	125	39,00	195	46,80	281	54,60	382	62,40	499	70,20	632

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
7,80	60,84	475	15,60	31	23,40	70	31,20	125	39,00	195	46,80	281	54,60	382	62,40	499	70,20	632
7,81	61,00	476	15,62	31	23,43	70	31,24	125	39,05	195	46,86	281	54,67	383	62,48	500	70,29	633
7,82	61,15	478	15,64	31	23,46	70	31,28	125	39,10	196	46,92	282	54,74	383	62,56	500	70,38	633
7,83	61,31	480	15,66	31	23,49	70	31,32	125	39,15	196	46,98	282	54,81	384	62,64	501	70,47	634
7,84	61,47	482	15,68	31	23,52	71	31,36	125	39,20	196	47,04	282	54,88	384	62,72	502	70,56	635
7,85	61,62	484	15,70	31	23,55	71	31,40	126	39,25	196	47,10	283	54,95	385	62,80	502	70,65	636
7,86	61,78	486	15,72	31	23,58	71	31,44	126	39,30	196	47,16	283	55,02	385	62,88	503	70,74	637
7,87	61,94	487	15,74	31	23,61	71	31,48	126	39,35	197	47,22	283	55,09	386	62,96	504	70,83	637
7,88	62,09	489	15,76	32	23,64	71	31,52	126	39,40	197	47,28	284	55,16	386	63,04	504	70,92	638
7,89	62,25	491	15,78	32	23,67	71	31,56	126	39,45	197	47,34	284	55,23	387	63,12	505	71,01	639
7,90	62,41	493	15,80	32	23,70	71	31,60	126	39,50	198	47,40	284	55,30	387	63,20	506	71,10	640
7,91	62,57	495	15,82	32	23,73	71	31,64	127	39,55	198	47,46	285	55,37	388	63,28	506	71,19	641
7,92	62,73	497	15,84	32	23,76	71	31,68	127	39,60	198	47,52	285	55,44	388	63,36	507	71,28	642
7,93	62,88	499	15,86	32	23,79	71	31,72	127	39,65	198	47,58	285	55,51	389	63,44	508	71,37	642
7,94	63,04	501	15,88	32	23,82	71	31,76	127	39,70	198	47,64	286	55,58	389	63,52	508	71,46	643
7,95	63,20	502	15,90	32	23,85	72	31,80	127	39,75	199	47,70	286	55,65	390	63,60	509	71,55	644
7,96	63,36	504	15,92	32	23,88	72	31,84	127	39,80	199	47,76	287	55,72	390	63,68	509	71,64	645
7,97	63,52	506	15,94	32	23,91	72	31,88	128	39,85	199	47,82	287	55,79	391	63,76	510	71,73	646
7,98	63,68	508	15,96	32	23,94	72	31,92	128	39,90	200	47,88	287	55,86	391	63,84	511	71,82	646
7,99	63,84	510	15,98	32	23,97	72	31,96	128	39,95	200	47,94	288	55,93	392	63,92	511	71,91	647
8,00	64,00	512	16,00	32	24,00	72	32,00	128	40,00	200	48,00	288	56,00	392	64,00	512	72,00	648

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
8,00	64,00	512	16,00	32	24,00	72	32,00	128	40,00	200	48,00	288	56,00	392	64,00	512	72,00	648
8,01	64,16	514	16,02	32	24,03	72	32,04	128	40,05	200	48,06	288	56,07	392	64,08	513	72,09	649
8,02	64.32	516	16,04	32	24,06	72	32,08	128	40,10	200	48,12	289	56,14	393	64,16	513	72,18	650
8,03	64,48	518	16,06	32	24,09	72	32,12	128	40,15	201	48,18	289	56,21	393	64,24	514	72,27	650
8,04	64,64	520	16,08	32	24,12	72	32,16	129	40,20	201	48,24	289	56,28	394	64,32	515	72,36	651
8,05	64,80	522	16,10	32	24,15	72	32,20	129	40,25	201	48,30	290	56,35	394	64,40	515	72,45	652
8,06	64,96	524	16,12	32	24,18	73	32,24	129	40,30	202	48,36	290	56,42	395	64,48	516	72,54	653
8,07	65,12	526	16,14	32	24,21	73	32,28	129	40,35	202	48,42	290	56,49	395	64.56	516	72,63	654
8,08	65,29	528	16,16	32	24,24	73	32,32	129	40,40	202	48,48	291	56,56	396	64,64	517	72,72	654
8,09	65,45	529	16,18	32	24,27	73	32,36	129	40,45	202	48.54	291	56,63	396	64,72	518	72,81	655
8,10	65,61	531	16,20	32	24,30	73	32,40	130	40,50	202	48,60	292	56,70	397	64,80	518	72,90	656
8.11	65.77	533	16,22	32	24,33	73	32,44	130	40,55	203	48,66	292	56,77	397	64,88	519	72,99	657
8,12	65,93	535	16.24	32	24,36	73	32,48	130	40,60	203	48,72	292	56,84	398	64,96	520	73,08	658
8,13	66.10	537	16,26	33	24,39	73	32,52	130	40,65	203	48,78	293	56,91	398	65,04	520	73,17	659
8,14	66,26	539	16,28	33	24,42	73	32,56	130	40,70	204	48,84	293	56,98	399	65,12	521	73,26	659
8,15	66,42	541	16.30	33	24,45	73	32,60	130	40,75	204	48,90	293	57,05	399	65,20	522	73,35	660
8,16	66,59	543	16,32	33	24,48	73	32,64	131	40,80	204	48,96	294	57,12	400	65,28	522	73,44	661
8,17	66,75	545	16,34	33	24,51	74	32,68	131	40,85	204	49,02	294	57,19	400	65,36	523	73,53	662
8,18	66,91	547	16,36	33	24,54	74	32,72	131	40,90	204	49,08	294	57,26	401	65,44	524	73,62	663
8,19	67,08	549	16,38	33	24,57	74	32,76	131	40,95	205	49,14	295	57,33	401	65,52	524	73,71	663
8,20	67,24	551	16,40	33	24,60	74	32,80	131	41,00	205	49,20	295	57,40	402	65,60	525	73,80	664

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
8,20	67,24	551	16,40	33	24,60	74	32,80	131	41,00	205	49,20	295	57,40	402	65,60	525	73,80	664
8,21	67,40	553	16,42	33	24,63	74	32,84	131	41,05	205	49,26	296	57,47	402	65,68	525	73,89	665
8,22	67,57	555	16,44	33	24,66	74	32,88	132	41,10	206	49,32	296	57,54	403	65,76	526	73,98	666
8,23	67,73	557	16,46	33	24,69	74	32,92	132	41,15	206	49,38	296	57,61	403	65,84	527	74,07	667
8,24	67,90	559	16,48	33	24,72	74	32,96	132	41,20	206	49,44	297	57,68	404	65,92	527	74,16	667
8,25	68,06	562	16,50	33	24,75	74	33,00	132	41,25	206	49,50	297	57,75	404	66,00	528	74,25	668
8,26	68,23	564	16,52	33	24,78	74	33,04	132	41,30	206	49,56	297	57,82	405	66,08	529	74,34	669
8,27	68,39	566	16,54	33	24,81	74	33,08	132	41,35	207	49,62	298	57,89	405	66,16	529	74,43	670
8,28	68,56	568	16,56	33	24,84	75	33,12	132	41,40	207	49,68	298	57,96	406	66,24	530	74,52	671
8,29	68,72	570	16,58	33	24,87	75	33,16	133	41,45	207	49,74	298	58,03	406	66,32	531	74,61	671
8,30	68,89	572	16,60	33	24,90	75	33,20	133	41,50	208	49,80	299	58,10	407	66,40	531	74,70	672
8,31	69,06	574	16,62	33	24,93	75	33,24	133	41,55	208	49,86	299	58,17	407	66,48	532	74,79	673
8,32	69,22	576	16,64	33	24,96	75	33,28	133	41,60	208	49,92	300	58,24	408	66,56	532	74,88	674
8,33	69,39	578	16,66	33	24,99	75	33,32	133	41,65	208	49,98	300	58,31	408	66,64	533	74,97	675
8,34	69,56	580	16,68	33	25,02	75	33,36	133	41,70	208	50,04	300	58,38	409	66,72	534	75,06	676
8,35	69,72	582	16,70	33	25,05	75	33,40	134	41,75	209	50,10	301	58,45	409	66,80	534	75,15	676
8,36	69,89	584	16,72	33	25,08	75	33,44	134	41,80	209	50,16	301	58,52	410	66,88	535	75,24	677
8,37	70,06	586	16,74	33	25,11	75	33,48	134	41,85	209	50,22	301	58,59	410	66,96	536	75,33	678
8,38	70,22	588	16,76	34	25,14	75	33,52	134	41,90	210	50,28	302	58,66	411	67,04	536	75,42	679
8,39	70,39	591	16,78	34	25,17	76	33,56	134	41,95	210	50,34	302	58,73	411	67,12	537	75,51	680
8,40	70,56	593	16,80	34	25,20	76	33,60	134	42,00	210	50,40	302	58,80	412	67,20	538	75,60	680

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
8,40	70,56	593	16,80	34	25,20	76	33,60	134	42,00	210	50,40	302	58,80	412	67,20	538	75,60	680
8,41	70,73	595	16,82	34	25,23	76	33,64	135	42,05	210	50,46	303	58,87	412	67,28	538	75,69	681
8,42	70,90	597	16,84	34	25,26	76	33,68	135	42,10	210	50,52	303	58,94	413	67,36	539	75,78	682
8,43	71,06	599	16,86	34	25,29	76	33,72	135	42,15	211	50,58	303	59,01	413	67,44	540	75,87	683
8,44	71,23	601	16,88	34	25,32	76	33,76	135	42,20	211	50,64	304	59,08	414	67,52	540	75,96	684
8,45	71,40	603	16,90	34	25,35	76	33,80	135	42,25	211	50,70	304	59,15	414	67,60	541	76,05	684
8,46	71,57	605	16,92	34	25,38	76	33,84	135	42,30	212	50,76	305	59,22	415	67,68	541	76,14	685
8,47	71,74	608	16,94	34	25,41	76	33,88	136	42,35	212	50,82	305	59,29	415	67,76	542	76,23	686
8,48	71,91	610	16,96	34	25,44	76	33,92	136	42,40	212	50,88	305	59,36	416	67,84	543	76,32	687
8,49	72,08	612	16,98	34	25,47	76	33,96	136	42,45	212	50,94	305	59,43	416	67,92	543	76,41	688
8,50	72,25	614	17,00	34	25,50	76	34,00	135	42,50	212	51,00	306	59,50	416	68,00	544	76,50	688
8,51	72,42	616	17,02	34	25,53	77	34,04	136	42,55	213	51,06	306	59,57	417	68,08	545	76,59	689
8,52	72,59	618	17,04	34	25,56	77	34,08	136	42,60	213	51,12	307	59,64	417	68,16	545	73,68	690
8,53	72,76	621	17,06	34	25,59	77	34,12	136	42,65	213	51,18	307	59,71	418	68,24	546	76,77	691
8,54	72,93	623	17,08	34	25,62	77	34,16	137	42,70	214	51,24	307	59,78	418	68,32	547	76,86	692
8,55	73,10	625	17,10	34	25,65	77	34,20	137	42,75	214	51,30	308	59,85	419	68,40	547	76,95	693
8,56	73,27	627	17,12	34	25,68	77	34,24	137	42,80	214	51,36	308	59,92	419	68,48	548	77,04	693
8,57	73,44	629	17,14	34	25,71	77	34,28	137	42,85	214	51,42	308	59,99	420	68,56	549	77,13	694
8,58	73,62	632	17,16	34	25,74	77	34,32	137	42,90	214	51,48	309	60,06	420	68,64	549	77,22	695
8,59	73,79	634	17,18	34	25,77	77	34,36	137	42,95	215	51,54	309	60,13	421	68,72	550	77,31	696
8,60	73,96	636	17,20	34	25,80	77	34,40	138	43,00	215	51,60	310	60,20	421	68,80	550	77,40	697

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
8,60	73,96	636	17,20	34	25,80	77	34,40	138	43,00	215	51,60	310	60,20	421	68,80	550	77,40	697
8,61	74,13	638	17,22	34	25,83	77	34,44	138	43,05	215	51,66	310	60,27	422	68,88	551	77,49	697
8,62	74,30	641	17,24	34	25,86	78	34,48	138	43,10	216	51,72	310	60,34	422	68,96	552	77,58	698
8,63	74,48	643	17,26	35	25,89	78	34,52	138	43,15	216	51,78	311	60,41	423	69,04	552	77,67	699
8,64	74,65	645	17,28	35	25,92	78	34,56	138	43,20	216	51,84	311	60,48	423	69,12	553	77,76	700
8,65	74,82	647	17,30	35	25,95	78	34,60	138	43,25	216	51,90	311	60,55	424	69,20	554	77,85	701
8,66	75,00	649	17,32	35	25,98	78	34,61	139	43,30	216	51,96	312	60,62	424	69,28	554	77,94	701
8,67	75,17	652	17,31	35	26,01	78	34,68	139	43,35	217	52,02	312	60,69	425	69,36	555	78,03	702
8,68	75,34	654	17,36	35	26,04	78	34,72	139	43,40	217	52,08	312	60,76	425	69,44	556	78,12	703
8,69	75,52	656	17,38	35	26,07	78	34,76	139	43,45	217	52,14	313	60,83	426	69,52	556	78,21	704
8,70	75,69	659	17,40	35	26,10	78	31,80	139	43,50	218	52,20	313	60,90	426	69,60	557	78,30	705
8,71	75,86	661	17,42	35	26,13	78	34,81	139	43,55	218	52,26	314	60,97	427	69,68	557	78,39	706
8,72	76,04	663	17,44	35	26,16	78	34,88	140	43,60	218	52,32	314	61,04	427	69,76	558	78,48	706
8,73	76,21	665	17,46	35	26,19	79	34,92	140	43,65	218	52,38	314	61,11	428	69,84	559	78,57	707
8,74	76,39	668	17,48	35	26,22	79	31,96	140	43,70	218	52,44	315	61,18	428	69,92	559	78,66	708
8,75	76,56	670	17,50	35	26,25	79	35,00	140	43,75	219	52,50	315	61,25	429	70,00	560	78,75	709
8,76	76,74	672	17,52	35	26,28	79	35,04	140	43,80	219	52,56	315	61,32	429	70,08	561	78,84	710
8,77	76,91	675	17,51	35	26,31	79	35,08	140	43,85	219	52,62	316	61,39	430	70,16	561	78,93	710
8,78	77,09	677	17,56	35	26,34	79	35,12	140	43,90	220	52,68	316	61,46	430	70,24	562	79,02	711
8,79	77,26	679	17,58	35	26,37	79	35,16	141	43,95	220	52,74	316	61,53	431	70,32	563	79,11	712
8,80	77,44	681	17,60	35	26,40	79	35,20	141	44,00	220	52,80	317	61,60	431	70,40	563	79,20	713

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
8,80	77,44	681	17,60	35	26,40	79	35,20	141	44,00	220	52,80	317	61,60	431	70,40	563	79,20	713
8,81	77,62	684	17,62	35	26,43	79	35,24	141	44,05	220	52,86	317	61,67	432	70,48	564	79,29	714
8,82	77,79	686	17,64	35	26,46	79	35,28	141	44,10	220	52,92	318	61,74	432	70,56	564	79,38	714
8,83	77,97	688	17,66	35	26,49	79	35,32	141	44,15	221	52,98	318	61,81	433	70,64	565	79,47	715
8,84	78,15	691	17,68	35	26,52	80	35,36	141	44,20	221	53,04	318	61,88	433	70,72	566	79,56	716
8,85	78,32	693	17,70	35	26,55	80	35,40	142	44,25	221	53,10	319	61,95	434	70,80	566	79,65	717
8,86	78,50	696	17,72	35	26,58	80	35,44	142	44,30	222	53,16	319	62,02	434	70,88	567	79,74	718
8,87	78,68	698	17,74	35	26,61	80	35,48	142	44,35	222	53,22	319	62,09	435	70,96	568	79,83	718
8,88	78,85	700	17,76	36	26,64	80	35,52	142	44,40	222	53,28	320	62,16	435	71,04	568	79,92	719
8,89	79,03	703	17,78	36	26,67	80	35,56	142	44,45	222	53,34	320	62,23	436	71,12	569	80,01	720
8,90	79,21	705	17,80	36	26,70	80	35,60	142	44,50	222	53,40	320	62,30	436	71,20	570	80,10	721
8,91	79,39	707	17,82	36	26,73	80	35,64	143	44,55	223	53,46	321	62,37	437	71,28	570	80,19	722
8,92	79,57	710	17,84	36	26,76	80	35,68	143	44,60	223	53,52	321	62,44	437	71,36	571	80,28	722
8,93	79,74	712	17,86	36	26,79	80	35,72	143	44,65	223	53,58	321	62,51	438	71,44	572	80,37	723
8,94	79,92	715	17,88	36	26,82	80	35,76	143	44,70	224	53,64	322	62,58	438	71,52	572	80,46	724
8,95	80,10	717	17,90	36	26,85	81	35,80	143	44,75	224	53,70	322	62,65	439	71,60	573	80,55	725
8,96	80,28	719	17,92	36	26,88	81	35,84	143	44,80	224	53,76	323	62,72	439	71,68	573	80,64	726
8,97	80,46	722	17,94	36	26,91	81	35,88	144	44,85	224	53,82	323	62,79	440	71,76	574	80,73	727
8,98	80,64	724	17,96	36	26,94	81	35,92	144	44,90	224	53,88	323	62,86	440	71,84	575	80,82	727
8,99	80,82	727	17,98	36	26,97	81	35,96	144	44,95	225	53,94	324	62,93	441	71,92	575	80,91	728
9,00	81,00	729	18,00	36	27,00	81	36,00	144	45,00	225	54,00	324	63,00	441	72,00	576	81,00	729

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
9,00	81,00	729	18,00	36	27,00	81	36,00	144	45,00	225	54,00	324	63,00	441	72,00	576	81,00	729
9,01	81,18	731	18,02	36	27,03	81	36,04	144	45,05	225	54,06	324	63,07	441	72,08	577	81,09	730
9,02	81,36	734	18,04	36	27,06	81	36,08	144	45,10	226	54,12	325	63,14	442	72,16	577	81,18	731
9,03	81,54	736	18,06	36	27,09	81	36,12	141	45,15	226	54,18	325	63,21	442	72,24	578	81,27	731
9,04	81,72	739	18,08	36	27,12	81	36,16	145	45,20	226	54,24	325	63,28	443	72,32	579	81,36	732
9,05	81,90	741	18,10	36	27,15	81	36,20	145	45,25	226	54,30	326	63,35	443	72,40	579	81,45	733
9,06	82,08	744	18,12	36	27,18	82	36,24	145	45,30	226	54,36	326	63,42	444	72,48	580	81,54	734
9,07	82,26	746	18,14	36	27,21	82	36,28	145	45,35	227	54,42	326	63,49	444	72,56	580	81,63	735
9,08	82,45	749	18,16	36	27,24	82	36,32	145	45,40	227	54,48	327	63,56	445	72,64	581	81,72	735
9,09	82,63	751	18,18	36	27,27	82	36,36	145	45,45	227	54,54	327	63,63	445	72,72	582	81,81	736
9,10	82,81	754	18,20	36	27,30	82	36,40	146	45,50	228	54,60	328	63,70	446	72,80	582	81,90	737
9,11	82,99	756	18,22	36	27,33	82	36,44	146	45,55	228	54,66	328	63,77	446	72,88	583	81,99	738
9,12	83,17	759	18,24	36	27,36	82	36,48	146	45,60	228	54,72	328	63,84	447	72,96	584	82,08	739
9,13	83,36	761	18,26	37	27,39	82	36,52	146	45,65	228	54,78	329	63,91	447	73,04	584	82,17	740
9,14	83,54	764	18,28	37	27,42	82	36,56	146	45,70	228	54,84	329	63,98	448	73,12	585	82,26	740
9,15	83,72	766	18,30	37	27,45	82	36,60	146	45,75	229	54,90	329	64,05	448	73,20	586	82,35	741
9,16	83,91	769	18,32	37	27,48	82	36,64	147	45,80	229	54,96	330	64,12	449	73,28	586	82,44	742
9,17	84,09	771	18,34	37	27,51	83	36,68	147	45,85	229	55,02	330	64,19	449	73,36	587	82,53	743
9,18	84,27	774	18,36	37	27,54	83	36,72	147	45,90	230	55,08	330	64,26	450	73,44	588	82,62	744
9,19	84,46	776	18,38	37	27,57	83	36,76	147	45,95	230	55,14	331	64,33	450	73,52	588	82,71	744
9,20	84,64	779	18,40	37	27,60	83	36,80	147	46,00	230	55,20	331	64,40	451	73,60	589	82,80	745

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
9,20	84,64	779	18,40	37	27,60	83	36,80	147	46,00	230	55,20	331	64,40	451	73,60	589	82,80	745
9,21	84,82	781	18,42	37	27,63	83	36,84	147	46,05	230	55,26	332	64,47	451	73,68	589	82,89	746
9,22	85,01	784	18,44	37	27,66	83	36,88	148	46,10	230	55,32	332	64,54	452	73,76	590	82,98	747
9,23	85,19	786	18,46	37	27,69	83	36,92	148	46,15	231	55,38	332	64,61	452	73,84	591	83,07	748
9,24	85,38	789	18,48	37	27,72	83	36,96	148	46,20	231	55,44	333	64,68	453	73,92	591	83,16	748
9,25	85,56	791	18,50	37	27,75	83	37,00	148	46,25	231	55,50	333	64,75	453	74,00	592	83,25	749
9,26	85,75	794	18,52	37	27,78	83	37,04	148	46,30	232	55,56	333	64,82	454	74,08	593	83,34	750
9,27	85,93	797	18,54	37	27,81	83	37,08	148	46,35	232	55,62	334	64,89	454	74,16	593	83,43	751
9,28	86,12	799	18,56	37	27,84	84	37,12	148	46,40	232	55,68	334	64,96	455	74,24	594	83,52	752
9,29	86,30	802	18,58	37	27,87	84	37,16	149	46,45	232	55,74	334	65,03	455	74,32	595	83,61	752
9,30	86,49	804	18,60	37	27,90	84	37,20	149	46,50	232	55,80	335	65,10	456	74,40	595	83,70	753
9,31	86,68	807	18,62	37	27,93	84	37,24	149	46,55	233	55,86	335	65,17	456	74,48	596	83,79	754
9,32	86,86	810	18,64	37	27,96	84	37,28	149	46,60	233	55,92	336	65,24	457	74,56	596	83,88	755
9,33	87,05	812	18,66	37	27,99	84	37,32	149	46,65	233	55,98	336	65,31	457	74,64	597	83,97	756
9,34	87,24	815	18,68	37	28,02	84	37,36	149	46,70	234	56,04	336	65,38	458	74,72	598	84,06	757
9,35	87,42	817	18,70	37	28,05	84	37,40	150	46,75	234	56,10	337	65,45	458	74,80	598	84,15	757
9,36	87,61	820	18,72	37	28,08	84	37,44	150	46,80	234	56,16	337	65,52	459	74,88	599	84,24	758
9,37	87,80	823	18,74	37	28,11	84	37,48	150	46,85	234	56,22	337	65,59	459	74,96	600	84,33	759
9,38	87,98	825	18,76	38	28,14	84	37,52	150	46,90	234	56,28	338	65,66	460	75,04	600	84,42	760
9,39	88,17	828	18,78	38	28,17	85	37,56	150	46,95	235	56,34	338	65,73	460	75,12	601	84,51	761
9,40	88,36	831	18,80	38	28,20	85	37,60	150	47,00	235	56,40	338	65,80	461	75,20	602	84,60	761

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
9,40	88,36	831	18,80	38	28,20	85	37,60	150	47,00	235	56,40	338	65,80	461	75,20	602	84,60	761
9,41	88,55	833	18,82	38	28,23	85	37,64	151	47,05	235	56,46	339	65,87	461	75,28	602	84,69	762
9,42	88,74	836	18,84	38	28,26	85	37,68	151	47,10	236	56,52	339	65,94	462	75,36	603	84,78	763
9,43	88,92	839	18,86	38	28,29	85	37,72	151	47,15	236	56,58	339	66,01	462	75,44	604	84,87	764
9,44	89,11	841	18,88	38	28,32	85	37,76	151	47,20	236	56,64	340	66,08	463	75,52	604	84,96	765
9,45	89,30	844	18,90	38	28,35	85	37,80	151	47,25	236	56,70	340	66,15	463	75,60	605	85,05	765
9,46	89,49	847	18,92	38	28,38	85	37,84	151	47,30	236	56,76	341	66,22	464	75,68	605	85,14	766
9,47	89,68	849	18,94	38	28,41	85	37,88	152	47,35	237	56,82	341	66,29	464	75,76	606	85,23	767
9,48	89,87	852	18,96	38	28,44	85	37,92	152	47,40	237	56,88	341	66,36	465	75,84	607	85,32	768
9,49	90,06	855	18,98	38	28,47	85	37,96	152	47,45	237	56,94	342	66,43	465	75,92	607	85,41	769
9,50	90,25	857	19,00	38	28,50	86	38,00	152	47,50	238	57,00	342	66,50	466	76,00	608	85,50	770
9,51	90,44	860	19,02	38	28,53	86	38,04	152	47,55	238	57,06	342	66,57	466	76,08	609	85,59	770
9,52	90,63	863	19,04	38	28,56	86	38,08	152	47,60	238	57,12	343	66,64	466	76,16	609	85,68	771
9,53	90,82	866	19,06	38	28,59	86	38,12	152	47,65	238	57,18	343	66,71	467	76,24	610	85,77	772
9,54	91,01	868	19,08	38	28,62	86	38,16	153	47,70	238	57,24	343	66,78	467	76,32	611	85,86	773
9,55	91,20	871	19,10	38	28,65	86	38,20	153	47,75	239	57,30	344	66,85	468	76,40	611	85,95	774
9,56	91,39	874	19,12	38	28,68	86	38,24	153	47,80	239	57,36	344	66,92	468	76,48	612	86,04	774
9,57	91,58	876	19,14	38	28,71	86	38,28	153	47,85	239	57,42	344	66,99	469	76,56	612	86,13	775
9,58	91,78	879	19,16	38	28,74	86	38,32	153	47,90	240	57,48	345	67,06	469	76,64	613	86,22	776
9,59	91,97	882	19,18	38	28,77	86	38,36	153	47,95	240	57,54	345	67,13	470	76,72	614	86,31	777
9,60	92,16	885	19,20	38	28,80	86	38,40	154	48,00	240	57,60	346	67,20	470	76,80	614	86,40	777

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
9,60	92,16	885	19,20	38	28,80	86	38,40	154	48,00	240	57,60	346	67,20	470	76,80	614	86,40	778
9,61	92,35	888	19,22	38	28,83	86	38,44	154	48,05	240	57,66	346	67,27	471	76,88	615	86,49	778
9,62	92,54	890	19,24	38	28,86	87	38,48	154	48,10	240	57,72	346	67,34	471	76,96	616	86,58	779
9,63	92,74	893	19,26	39	28,89	87	38,52	154	48,15	241	57,78	347	67,41	472	77,04	616	86,67	780
9,64	92,93	896	19,28	39	28,92	87	38,56	154	48,20	241	57,84	347	67,48	472	77,12	617	86,76	781
9,65	93,12	899	19,30	39	28,95	87	38,60	154	48,25	241	57,90	347	67,55	473	77,20	618	86,85	782
9,66	93,32	901	19,32	39	28,98	87	38,64	155	48,30	242	57,96	348	67,62	473	77,28	618	86,94	782
9,67	93,51	904	19,34	39	29,01	87	38,68	155	48,35	242	58,02	348	67,69	474	77,36	619	87,03	783
9,68	93,70	907	19,36	39	29,04	87	38,72	155	48,40	242	58,08	348	67,76	474	77,44	620	87,12	784
9,69	93,90	910	19,38	39	29,07	87	38,76	155	48,45	242	58,14	349	67,83	475	77,52	620	87,21	785
9,70	94,09	913	19,40	39	29,10	87	38,80	155	48,50	242	58,20	349	67,90	475	77,60	621	87,30	786
9,71	94,28	915	19,42	39	29,13	87	38,84	155	48,55	243	58,26	350	67,97	476	77,68	621	87,39	786
9,72	94,48	918	19,44	39	29,16	87	38,88	156	48,60	243	58,32	350	68,04	476	77,76	622	87,48	787
9,73	94,67	921	19,46	39	29,19	88	38,92	156	48,65	243	58,38	350	68,11	477	77,84	623	87,57	788
9,74	94,87	924	19,48	39	29,22	88	38,96	156	48,70	244	58,44	351	68,18	477	77,92	623	87,66	789
9,75	95,06	927	19,50	39	29,25	88	39,00	156	48,75	244	58,50	351	68,25	478	78,00	624	87,75	790
9,76	95,26	930	19,52	39	29,28	88	39,04	156	48,80	244	58,56	351	68,32	478	78,08	625	87,84	791
9,77	95,45	933	19,54	39	29,31	88	39,08	156	48,85	244	58,62	352	68,39	479	78,16	625	87,93	791
9,78	95,65	935	19,56	39	29,34	88	39,12	156	48,90	244	58,68	352	68,46	479	78,24	626	88,02	792
9,79	95,84	938	19,58	39	29,37	88	39,16	157	48,95	245	58,74	352	68,53	480	78,32	627	88,11	793
9,80	96,04	941	19,60	39	29,40	88	39,20	157	49,00	245	58,80	353	68,60	480	78,40	627	88,20	794

1			2		3		4		5		6		7		8		9	
y	y^2	y^3	$2y$	$4y$	$3y$	$9y$	$4y$	$16y$	$5y$	$25y$	$6y$	$36y$	$7y$	$49y$	$8y$	$64y$	$9y$	$81y$
9,80	96,04	941	19,60	39	29,40	88	39,20	157	49,00	245	58,80	353	68,60	480	78,40	627	88,20	794
9,81	96,24	944	19,62	39	29,43	88	39,24	157	49,05	245	58,86	353	68,67	481	78,48	628	88,29	795
9,82	96,43	947	19,64	39	29,46	88	39,28	157	49,10	246	58,92	354	68,74	481	78,56	628	88,38	795
9,83	96,63	950	19,66	39	29,49	88	39,32	157	49,15	246	58,98	354	68,81	482	78,64	629	88,47	796
9,84	96,83	953	19,68	39	39,52	89	39,36	157	49,20	246	59,04	354	68,88	482	78,72	630	88,56	797
9,85	97,02	356	19,70	39	29,55	89	39,40	158	49,25	246	59,10	355	68,95	483	78,80	630	88,65	798
9,86	97,22	959	19,72	39	29,58	89	39,44	158	49,30	246	59,16	355	69,02	483	78,88	631	88,74	799
9,87	97,42	962	19,74	39	29,61	89	39,48	158	49,35	247	59,22	355	69,09	484	78,96	632	88,83	799
9,88	97,61	964	19,76	40	29,64	89	39,52	158	49,40	247	59,28	356	69,16	484	79,04	632	88,92	800
9,89	97,81	967	19,78	40	29,67	89	39,56	158	49,45	247	59,34	356	69,23	485	79,12	633	89,01	801
9,90	98,01	970	19,80	40	29,70	89	39,60	158	49,50	248	59,40	356	69,30	485	79,20	634	89,10	802
9,91	98,21	973	19,82	40	29,73	89	39,64	159	49,55	248	59,46	357	69,37	486	79,28	634	89,19	803
9,92	98,41	976	19,84	40	29,76	89	39,68	159	49,60	248	59,52	357	69,44	486	79,36	635	89,28	804
9,93	98,60	979	19,86	40	29,79	89	39,72	159	49,65	248	59,58	357	69,51	487	79,44	636	89,37	804
9,94	98,80	982	19,88	40	29,82	89	39,76	159	49,70	248	59,64	358	69,58	487	79,52	636	89,46	805
9,95	99,00	985	19,90	40	29,85	90	49,80	159	49,75	249	59,70	358	69,65	488	79,60	637	89,55	806
9,96	99,20	988	19,92	40	29,88	90	39,84	159	49,80	249	59,76	359	69,72	488	79,68	637	89,64	807
9,97	99,40	991	19,94	40	29,91	90	39,88	160	49,85	249	59,82	359	69,79	489	79,76	638	89,73	808
9,98	99,60	994	19,96	40	29,94	90	39,92	160	49,90	250	59,88	359	69,86	489	79,84	639	89,82	808
9,99	99,80	997	19,98	40	29,97	90	39,96	160	49,95	250	59,94	360	69,93	490	79,92	639	89,91	809
10,00	100,00	1000	20,00	40	30,00	90	40,00	160	50,00	250	60,00	360	70,00	490	80,00	640	90,00	810

ЛИТЕРАТУРА

К разделу „Статика корабля"

Ко всем главам

А. Н. Крылов, Теория корабля, Собр. тр. акад. А. Н. Крылова, т. IX, ч. I и II, 1948.

В. В. Семенов Тян-Шанский, Статика корабля, Судпромгиз, 1940.

В. Г. Власов, Статика корабля, Воениздат, 1948.

А. П. Фан дер Флит, Теория корабля, ч. I, Литографированное издание.

С. Т. Яковлев, Теория корабля, 1938.

Э. Э. Рупперт, Теория корабля, Гостранспиздат, 1935.

В. В. Семенов Тян-Шанский, Краткий курс теории корабля, ОНТИ, 1935.

Г. Е. Павленко, Проблемы статики корабля, Морской транспорт, 1949.

К главе I

В. Г. Власов, „О точности приближенных формул квадратур", Изв. ВМА, 1937.

Г. А. Фирсов и К. М. Иванов, „Диаграмма для определения водоизмещения и положения центра величины по длине", Судостр. № 2, 1945.

Ю. А. Шиманский, „Нужно ли учитывать вес воздуха в нагрузке корабля", Сб. стат. по судостр. НКСП, 1944.

И. А. Яковлев, „Приближенная формула для определения момента инерции площади ватерлинии малой полноты", Судостр. № 6, 1939, стр. 326.

К главе II

В. Г. Власов, „О влиянии прогиба корабля на посадку и остойчивость", Бюлл. НТК УВМС, 1929.

В. В. Семенов Тян-Шанский, „Влияние изменения основных размерений корпуса корабля на остойчивость". Тр. ЦНИИ 1946.

В. Л. Поздюнин, „Некоторые приближенные формулы, полезные при проектировании судов", Торг. фл. № 1/2, 1924.

П. Ф. Папкович, „Об остойчивости лодок в процессе погружения", Бюлл. НКТ, 1930.

П. Ф. Папкович, „Об остойчивости подлодок при крейсерском ходе", Сб. НИВК, 1934.

К главе III

В. Л. Поздюнин, Приближенные формулы для расчета остойчивости судов на больших углах крена, Изд. ЛКИ, 1937.

В. Г. Власов, „Приближенная формула для вычисления плеч остойчивости формы", Тр. НИСС, вып. 2, 1932.

Н. А. Заботкин, „Приближенные формулы для вычисления остойчивости судов на больших углах крена", Судостр. № 7, 1934.

С. Н. Благовещенский, „О приближенной формуле Власова для вычисления плеч остойчивости формы“, Морск. судостр. № 6, 1933.
В. В. Семенов Тян-Шанский, „Метод учета влияния надстроек на остойчивость на больших углах крена“, Судостр. № 4, 1935.
В. Г. Власов, „Остойчивость подводной лодки на больших углах крена“, Судостр. № 5, 1935.
И. А. Яковлев, „Графический способ построения кривых статической и динамической остойчивости“, Судостр. № 7—8, 1939, стр. 420.
А. С. Фишер, „К вопросу о методах вычисления плеч статической остойчивости“, Судостр. № 6, 1947.

К главе IV

И. Г. Бубнов, „О непотопляемости судов“, Морск. сб. № 4, 1900.
В. Г. Власов, Новый метод вычисления элементов корабля, Л-д, 1931.
В. Г. Власов, „Таблицы для выравнивания корабля в бою“, Изв. ВМА. 1940.
В. Г. Власов, „Построение диаграммы статической остойчивости поврежденного корабля в бою“, Изв. ВМА, 1940.
С. Н. Благовещенский, „Приближенный способ проверки непотопляемости корабля“, Судостр. № 5, 1946.
В. А. Махин, „О построении аварийной диаграммы Рида путем использования пантокарен целого корабля“, Судостр. № 8, 1937.
В. А. Махин, „Применение метода Дарньи к расчету диаграмм поперечной остойчивости поврежденного корабля“, Судостр. № 12, 1939, стр. 675.
Морской Регистр СССР, Инструкция по установлению непотопляемости морских судов, Л.-М., 1948.
С. Т. Яковлев, Непотопляемость надводных кораблей, М. 1934.
Ю. А. Шиманский, „Расчет надводной непотопляемости подводных лодок“, Судостр. № 2, 1947.
Ю. А. Шиманский, „Исследование непотопляемости корабля“, Бюлл. НТК УВМС, 1930.

К главе V

И. Г. Бубнов, „Спуск судна на воду“, Морск. сб. № 2, 3, 5, 6, 1900.
В. Г. Власов, „Спуск на воду“, ОНТИ, 1936.
Н. А. Николаев, Боковой спуск и его расчет, Оборонгиз, 1946.
Ю. С. Яковлев, Аналитический метод расчета поперечного спуска кораблей, Воениздат, 1947.
Справочник по судостроению, т. XIII, ч. II, Оборонгиз, 1939.
В. В. Цеханович, Спуск судов на воду, ОГИЗ, 1931.
Г. Е. Павленко, Исследование по спуску судов. Теория и практика судостроения, вып. I, 1928.
В. Г. Власов, „О статическом расчете спуска судна“, Бюлл. НИВК; ВМС РККА, № 1, 1933.
А. Глазман, „Боковой спуск судов“, Судостр. № 11, 1935.
В. Гостев, „Описание расчета спуска на воду рефрижераторных теплоходов“, Торг. фл. № 3/5, 1926.
Г. Н. Волков, Спуск судов на воду и спусковые работы, ОНТИ, 1935.
Ю. А. Шиманский, „Расчет цепных задержников при спуске судна“. Судостр. № 4, 1937.
В. Г. Власов, „О расчете канатных задержников“, Судостр. № 12, 1935.
Н. А. Николаев и А. Н. Шмырев, „Торможение корабля при спуске“, Судостр, № 11—12, 1941.
В. Г. Власов, „Расчет спусковых драг“, Изв. ВМА, РКВМФ, вып. 1, 1939.

К главе VI

П. Г. Авотин, „Об изменении величины кренящего момента от давления ветра при наклонениях судна", Судостр. № 11, 1940.

С. Н. Благовещенский, „О методе нормирования остойчивости судов", Тр. НИСС, вып. 2, Оборонгиз, 1933.

Г. В. Ефремов, „Приближенная оценка остойчивости речных винтовых буксиров на рывок", Судостр. № 11, 1935.

Морской Регистр СССР, Временные нормы остойчивости для торговых морских и рейдовых судов, 1948.

Г. А. Фирсов, „Формула для расчета крена корабля на установившейся циркуляции", Судостр. № 2, 1946.

Г. А. Фирсов, „К вопросу о влиянии сопротивления воды на остойчивость всплывающего корабля", Судостр. № 3, 1946.

Ю. А. Шиманский, „Крен и качка корабля при залповой стрельбе из орудий", Бюлл. НТК УВМС, 1928.

Г. А. Фирсов, „К вопросу об остойчивости кораблей при действии шквала", Изв. АН СССР, № 7—8, 1945.

Ю. А. Шиманский, „Теория всплытия затонувшего судна", Сб. Эпрон, 1939.

А. Н. Крылов, „Статика судоподъема", Сб. Судоподъем № 2, 1945.

В. Ф. Кюнстлер, „О теории всплытия затонувшего судна", Сб. Эпрон, 1936.

А. Н. Шмырев, А. Г. Константинов, М. М. Матус, Аварийно-спасательное дело, Воениздат, 1946.

К разделу **„Качка корабля"**

К о всем главам

А. Н. Крылов, Качка корабля, ВМА РККФ, 1938.

А. Н. Крылов, О боковой качке корабля, Военмориздат, 1942.

Г. Е. Павленко, Качка судов, Гостранснздат, 1935.

А. П. Фан дер Флит, Теория корабля, ч. III, 1910.

К главе I

С. Н. Благовещенский, „Боковая качка корабля с любой заданной диаграммой остойчивости", Судостр. № 4, 1946.

Г. М. Хорошанский, „Бортовая качка корабля с заданной диаграммой остойчивости", Тр. ЦНИИ МСП, № 30, 1948.

Г. Е. Павленко, „К теории боковой качки в связи с определением безопасности корабля на волнении", Изв. ОНТ АН СССР, № 12, 1947.

В. Г. Власов, „О периоде свободных колебаний при боковой качке", Бюлл. НТК УВМС, 1930.

В. Г. Власов, „О влиянии размеров корабля на амплитуду вынужденных колебаний при боковой качке", Бюлл. НТК УВМС, 1928.

В. А. Махин, „Схема расчета поперечного момента инерции массы корабля", Судостр. № 6, 1938.

П. О. Зандин, „Расчетная волна для речных, озерных и рейдовых судов", Судостр. № 1, 1938.

И. А. Яковлев, „Ординаты профиля трохоидальной волны", Судостр. № 1, 1939, стр. 22.

К главам II и III

Г. Е. Павленко, „Теория и расчет продольной качки корабля", Тр. ЛКИ, 1939.

Н. Е. Жуковский, О колебаниях тел, плавающих на поверхности жидкости малой глубины, Полн. собр. соч., т. 4, Изд. АН СССР.

М. Д. Хаскинд, „Гидродинамическая теория качки корабля на волнении", Прикл. матем. и мех., т. X, вып. I, 1946.
А. С. Перельмутр, „Экспериментальное исследование демпфирования килевой качки", Прикл. матем. и мех., т. X, вып. I, 1946.
М. Д. Хаскинд, „Качка корабля на спокойной воде", Изв. ОТН АН СССР, № 1, 1936.
Г. Е. Павленко, „Экспериментальные исследования по качке моделей судов в бассейне", Бюлл. НИИВК, № 1, 1936.

Ответственный редактор *А. Б. Знаменский.*
Технический редактор *А. М. Усова.*
Корректор *Н. А. Кноке.*

Подписано к печати 11/V-1950 г. Т-02684.
Тираж 3000. Формат бумаги 60×92$^{1}/_{16}$.
Объем 35$^{1}/_{2}$ печ. л. + 3 вкл. Уч.-изд. л. 40,05.
Бумажных л. 17$^{3}/_{4}$. Зак. № 5391.

4-я типография им. Евг. Соколовой
Главполиграфиздата при Совете Министров СССР.
Ленинград, Измайловский пр., 29

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
167	16 снизу	ΔT	$\Delta T_{н}$	тип.
302	формула (709)	$p\,\frac{L-\Delta l}{E}+\ldots$	$p\,\frac{L-\Delta L}{E}+\ldots$	авт.
308	10 снизу	s_1	s_1'	тип.
319	формула (741)	$\ldots\theta'^2\,[r-H\,(\beta-f_d+ +2f_d r'\theta']\ldots$	$\ldots\theta'^2\,[r-H\,(\beta+f_d)]+ +2f_d r'\theta'\ldots$	авт.
418	формула (127)	$\ldots=\sqrt{\frac{A_1\,(\theta_0-\theta_1)}{D\Delta l_{ср}}}$	$\ldots+\sqrt{\frac{A_1\,(\theta_0-\theta_1)}{D\Delta l_{ср}}}\ldots$	ред.
159	таблица под рис. 43 и 44, столбец XXII строка 3	1,001	1,021	корр.

Заказ 5391.

